Aus der Arbeitsgruppe für Funktionelle Morphologie
der Abteilung für Naturwissenschaftliche Medizin

ÜBER DIE HYDRODYNAMIK SCHNELL SCHWIMMENDER WIRBELTIERE

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
der Abteilung für Biologie
der Ruhr-Universität Bochum

von

BODO UNGERECHTS

1981

Bochum 1980

Aus der Arbeitsgruppe für Funktionelle Morphologie
der Abteilung für Naturwissenschaftliche Medizin

ÜBER DIE HYDRODYNAMIK SCHNELL SCHWIMMENDER WIRBELTIERE

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
der Abteilung für Biologie
der Ruhr-Universität Bochum

von

BODO UNGERECHTS

Bochum 1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung: 30. März 1981

Gutachter: Professor Dr. H. Preuschoft
Professor Dr. J. Schwartzkopff
Priv.-Doz. Dr.-Ing. V. Vasanta Ram

MEINEN ELTERN

Danksagung

Herrn Prof. H. Preuschoft danke ich für die Anregung zu dieser Untersuchung und für seine richtungsweisende Kritik im Verlauf der Arbeit.

Für das dieser Arbeit entgegengebrachte kritische Interesse gilt mein Dank Herrn Prof. J. Schwartzkopff.

Herr Prof. K. Gersten ermöglichte die Durchführung der Experimente in seinem Institut für Thermo- und Fluiddynamik. Herrn Priv.Doz.Dr.Ing. V. Vasanta Ram danke ich für seine Bereitschaft zur interdisziplinären Zusammenarbeit, für die maßvolle Einführung in die Strömungsmechanik sowie für Rat und Hilfe bei der Konzeption der Versuche. Den Mitarbeitern dieses Institutes, insbesondere den Herren E. Beese, D. Schönhoff und Th. Jendro danke ich für die stets freundliche Hilfe bei den Schwierigkeiten apparativen Ursprungs.

Herrn M. Schöwer, der das Bewegungsmodul anfertigte und Herrn H.-J. Kaden, der die Modelle geformt und gegossen hat, bin ich für ihre konstruktive Mitarbeit zu Dank verpflichtet.

Mein Dank darüber hinaus gilt Frau M. Wischniwetzki für die liebevolle Anfertigung der Abbildungen und Frau H. Spiethoff für das Schreiben des Manuskriptes

Diese Arbeit ist z.T. aus den Mitteln des Titels "Interdisziplin" der Ruhr-Universität Bochum gefördert worden.

Inhaltsangabe

0. Übersicht über die benutzten Zeichen

1. Einleitung

1.1. Graysches Paradoxon

1.2. Leistungsangaben

1.3. Übersicht über die Kapitel

2. Theoretische Strömungsmechanik starrer Körper

2.1. Grenzschicht

2.2. Außenströmung, hydrodynamischer Druck

2.2.1. Bernoullische Gleichung

2.2.2. Druckbeiwert, c_p, Druckverteilung

2.3. Widerstand

2.4. Laminare und turbulente Strömung, Umschlag

2.5. Reynolds-Zahl, Re

2.6. Ablösung

3. Theorien zur Turbulenzverminderung

3.1. Delphinhaut

3.2. Haifischhaut

3.3. Körperoberfläche bei Knochenfischen

4. Gemeinsamkeiten der schnell schwimmenden Wirbeltiere

4.1. Körpergestalt

4.2. Bewegungen

4.2.1. Wellenbewegung

4.2.2. Scombridiforme Bewegung

4.3. Eigene kinematischen Analysen

4.3.1. Kinematische Analyse der Delphinbewegung

4.3.2. Kinematische Analyse von Thunfischen

5. Strömungen und periodische Formveränderungen
5.1. Ziele der eigenen Experimente
5.2. Verwendung beweglicher Modelle

6. Experimentelle Konzeption
6.1. Flexible Modelle
6.2. Wasserkanal
6.3. Apparatur zum Bewegen des Modells
6.4. Modellarretierung
6.5. Meß- und Beobachtungsmethoden
6.5.1. Beobachtung der Strömung
6.5.2. Messung des hydrodynamischen Druckes
6.6. Abschätzung der Bewegungsparameter für die Modelle

7. Befunde
7.1. Filmauswertung
7.1.1. Bewegung der Modelle
7.1.2. Sichtbarmachung der Strömung
7.2. Gesamtwiderstand
7.3. Druckmessungen
7.3.1. Eigene Ergebnisse
7.3.1.1. Haimodell
7.3.1.2. Makrelenmodell
7.3.1.3. Delphinmodell
7.3.2. Vergleich der an den Modellen erzielten Ergebnisse
7.4. Umschlagverhalten der Strömung bei beweglichen Körpern
7.5. Vergleich der eigenen Ergebnisse mit der Literatur und Diskussion

8. Wahrnehmung des Druckfeldes durch die Tiere selbst

9. Zusammenfassung

10. Literatur

11. Abbildungen

0. Übersicht über die benutzten Zeichen

A = Amplitude, senkrecht zur Schwimmrichtung gemessener Abstand zwischen den gegenüberliegenden Umlenkpunkt $[A] = m$

G = Zwischenwirbelgelenke

L = Körperlänge $[L] = m$

M = Muskelkräfte

Mp = Meßstellen an der Körperoberfläche der Modelle

P = Leistung $[P] = Nm\ s^{-1}$

Re = Reynolds-Zahl $Re = \frac{v L \rho}{\eta}$

R_i = Resultierende Kräfte

T_b = Periode der Körperwelle, Kap. 4.2.1. $[T_b] = s$

T_w, T = Periode der Raumwelle, Dauer eines Zyklus $[T] = s$

T_s = Schub $[T_s] = N$

W_{ges} = Gesamtwiderstand $[W_{ges}] = N$

c_p = Druckbeiwert $cp = \frac{p - p_\infty}{1/2 \rho v_0} 2$ dimensionslos

c_w = Widerstandsbeiwert $c_w = \frac{2 W_{ges}}{\rho v_0^2 \text{Fläche}}$ dimensionslos

d = Körperdurchmesser $[d] = m$

l = Bezugslänge $[l] = m$

p = hydrodynamischer Druck $[p] = mm\ WS$

p_∞ = Umgebungsdruck

P_{ges} = Gesamtdruck

q = Staudruck $\quad q = 1/2\,\rho v^2 \quad [q] = kg\,m^{-1}s^{-2}$

t_i = Zeitpunkt innerhalb einer Periode T, $\quad [t_i] = s$

v_b = Körperwellengeschwindigkeit, Kap. 4.3.1. $\quad [v_b] = ms^{-1}$

v_0 = relative Schwimmgeschwindigkeit $\quad [v_0] = ms^{-1} = Ls^{-1}$

v_w = Geschwindigkeit der Raumwelle $\quad [v_w] = ms^{-1}$

w = transversale Geschwindigkeit $\quad [w] = ms^{-1}$

$x/_L$ = auf die Körperlänge bezogene x-Koordinate dimensionslos

Σ = reduzierte Frequenz $\quad \Sigma = \frac{\omega l}{v}$ dimensionslos

α = Anstellwinkel

β = Drehwinkel

γ = Anströmwinkel

δ = Grenzschichtdicke $\quad [\delta] = mm$

η = Viskösität $\quad [\eta] = \frac{Ns}{m^2}$

λ_b = Länge der Körperwelle, Kap. 4.2.1. $\quad [\lambda_b] = m$

λ_b/L = bezogene Wellenlänge dimensionslos

λ_w = Länge der Raumwelle $\quad [\lambda_w] = m$

ν = kinematische Zähigkeit $\quad \nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = m^2 s^{-1}$

ω = Frequenz $\quad [\omega] = s^{-1}$

ρ = Dichte $\quad [\rho] = \frac{kg}{m^3}$

1. Einleitung

Die Schwimmgeschwindigkeiten von Delphinen, großen Haien sowie einigen Thunfischen gleichen denen der von Menschen geschaffenen Schwimmkörper, wie Schiffen und Torpedos. In manchen Fällen sind die Leistungen der Tiere sogar größer als die der technischen Apparate. Letzteres erregt Bewunderung, erzeugt aber auch Neugierde wie es diese Tiere schaffen, so schnell zu schwimmen. Die Bewunderung wird besonders denjenigen Tierarten zuteil, die im Vergleich zu den technischen Körpern vergleichsweise klein sind, also eine Körperlänge zwischen 2-4 m aufweisen. Wale beeindrucken aufgrund ihres mächtigen Körpers, ihre Schwimmgeschwindigkeiten hingegen scheinen eher plausibel.

Die Berichte über die Geschwindigkeiten der schnellen Schwimmer hat Lang (1975) zusammengefaßt. So sind bei Delphinen 10 ms^{-1} für die Dauer von 10 sec gemessen worden. Bei längeren Beobachtungszeiten von 8 - 25 min wurden Geschwindigkeiten von $\bar{v}_0$ = 8,76 - 9,28 ms^{-1} gemessen. Aus biologischer Sicht erscheint es fragwürdig, die Geschwindigkeit in kmh^{-1} anzugeben, da es keine Beobachtungen gibt, die sich über einen so langen Zeitraum wie eine Stunde erstreckten.

Aufgrund der noch im Detail zu erläuternden gemeinsamen Merkmale (Kap. 4.) können Tiere verschiedenster Evolutionslinien in eine Gruppe von besonders schnell schwimmenden Wirbeltieren zusammengefaßt werden:

Klasse: Selachii	Fam.: Isuridae
Klasse: Pisces	Fam.: Scombridae, Xiphiidae, Istiophoridae
Klasse: Mammalia	Fam.: Delphinidae

In der Abb. 1 ist die Gruppe um das Profil eines Fischsauriers aus der ausgestorbenen Ordnung Ichtyosauria der Reptilien erweitert, da die Merkmale für die Gruppe der schnell schwimmenden Wirbeltiere wahrscheinlich auch diesen sekundär an das Leben im Meer angepaßten Tieren zukamen. Diese schnell schwimmenden Tiere erzeugen ihren Antrieb allein durch die Aktionen der Schwanzflosse. Die übrigen Körperbereiche, die Brust- und Bauchflossen leisten keinen Beitrag zum Vortrieb des Körpers, wie es bei anderen Wasserbewohnern zu beobachten ist.

1.1. Graysches Paradoxon

Die Angaben über die Schwimmgeschwindigkeiten von Delphinen hat Gray 1936 zur Grundlage eines Vergleichs der bremsenden Kräfte des Wassers und der antriebserzeugenden Muskelkräfte genommen. Der Widerstand ist unter folgenden Annahmen berechnet worden:

a) die Umströmungsverhältnisse entsprechen denen eines starren Körpers

b) die Umströmung ist turbulent

Beide Annahmen beeinflussen das Ergebnis der Berechnung stark.

Der Vergleich zeigte, daß der Widerstand bei v_0= 20 Knoten ($\sim$10 ms^{-1}) weit über der physiologischen Leistung P von 33 N ms^{-1} pro kg Muskulatur liegt, welche Vertebraten unter Versuchsbedingungen längerfristig freisetzen können. Diese Diskrepanz ist als "Graysches Paradoxon" bekannt und bis heute ungeklärt.

1.2. Leistungsangaben

Die maximale Leistung der Muskulatur eines im Meer lebenden Säugers und eines trainierten Athleten sind nach Hill (1950) vergleichbar. Er bezieht den Vergleich auf das Körpergewicht. Nach Wilkie (1960) beträgt die Leistung P eines trainierten Athleten für eine 20 min dauernde

Belastung mit 1,9 kg ms^{-1} (P = 19,0 N ms^{-1}) pro kg Muskulatur. Gray (1968) legt seinen Berechnungen P = 0,022 hp/lb Muskulatur (= 33 N ms^{-1}/Kg Muskulatur) als Leistungswert zugrunde. Parry (1949) geht bei seinen Leistungsberechnungen für Delphine von 17 W/kg Muskulatur (= 17 N ms^{-1}) aus. Wie stark die Leistung mit der Dauer der Belastung abnimmt, ist in Abb. 2 verdeutlicht.

Ein Vergleich zwischen den Leistungswerten von Athleten und Delphinen liegt nahe, da doch beide zu den Säugetieren gehören. Indessen könnte eine Übertragung der Werte von Menschen auf die Muskelleistung bei Fischen angezweifelt werden. Bainbridge (1961) hat deshalb Leistungswerte für Teleostier bestimmt. Er fand P_{Fisch} = 40 W/kg Körpergewicht (= 40 N ms^{-1}). Diese auf das Körpergewicht bezogenen Werte entsprechen größenordnungsmäßig den o.g. Beträgen, so daß von einer Übereinstimmung für die Gruppe der schnell schwimmenden Wirbeltiere ausgegangen werden kann. Schmidt-Nielsen (1972) hebt hervor, daß die reale Leistung P das Produkt aus Sauerstoffaufnahme und dem mechanischen Wirkungsgrad, e, ist, und führt aus: "Gray's calculation were for the very high speed of 20 knots, but on the other hand, he did not include in his calculations that the efficiency of muscle in performing external work is not 100 percent and the cost was therefore underestimated." Der mechanische Wirkungsgrad der biologischen Kraftmaschinen wird mit 30-35 % angegeben (Stegemann, 1977) und ist von mehreren Faktoren abhängig, die zum großen Teil mit den Stoffwechselprozessen in den Muskelzellen zusammenhängen, wie auch mit dem Leistungsvermögen des Kreislaufsystems.

Voronin (1973) hat untersucht, ob die Delphine leistungsfähigere Stoffwechselwege aufweisen oder ob ihr Blut mehr Sauerstoff trägt. Die Erhebung zeigt, daß es keine physiologischen Voraussetzungen gibt, die auf eine verbesserte Stoffwechselrate bei den schnell schwimmenden Wirbeltieren im Vergleich zum hochentwickelten Säugetier hindeuten.

Voronin weist aber darauf hin, daß die Leistung fast vollständig zum Antrieb verwandt werden kann, da kaum Kraft zum Ausbalancieren des Körpergewichts notwendig ist.

Grays Berechnungen der vom Widerstand abhängigen mechanischen Leistung P_m beschränken sich auf das Beispiel der Delphine. Es ist anzunehmen, daß sie auch auf schnell schwimmende, gleich große Haifische und Thune zutreffen, deren Muskelleistung (P_b) sich in vergleichbaren Größenordnungen bewegt. Hingegen stellt sich die Frage, ob zwischen der Muskelleistung der größten Furchenwale und der zur Überwindung des Widerstandes erforderlichen mechanischen Leistung eine ebenso offensichtliche Diskrepanz besteht.

Die mechanische Leistung P_m kann nach der standardisierten Newtonschen Gleichung berechnet werden.

$$P_m = 1/2 \; \rho \; A \; v_0^3 \; c_w$$

mit ρ = Dichte des Wassers $= 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

A = Körperoberfläche $\sim 0.4 \times L^2$ (Hill, 1950)

v_0 = Schwimmgeschwindigkeit

c_w = Widerstandsbeiwert

Nach den Angaben von Kramer 1960 lauten die Widerstandsbeiwerte für turbulente Strömungen:

$$c_{w(D)} = 4{,}5 \times 10^{-3} \qquad c_{w(W)} = 2{,}2 \times 10^{-3}$$

Ein Vergleich zwischen einem 2 m langen Delphin und einem 25 m langen Wal auf der Basis einer Schwimmgeschwindigkeit von 15 Knoten ($= 7{,}7 \text{ ms}^{-1}$) ergibt, daß die mechanische Leistung, die der Wal aufbringen muß, 67 mal so groß wie beim Delphin ist:

$$P_{m(W)} = 67 \times P_{m(D)}$$

Diese mechanische Leistung muß von der Muskulatur egalisiert werden. Die Muskelmasse M_m ist abhängig von der Körperlänge L; nach Bainbridge

(1961) besteht folgende Beziehung:

$$M_m = 0{,}005\ L^{2,9} \qquad ([M_m] = g,\ [L] = cm)$$

Nimmt man an, daß die Muskelleistung P_b proportional der Muskelmasse M_m ist, so folgt:

$$P_b \propto L^{2,9}$$

Vergleicht man auf dieser Basis die Muskelleistung P_b von Delphinen und Walen, so erhält man:

$$P_{b(W)} = 1520 \times P_{b(D)}$$

Die Muskelleistung eines Wals wäre demnach rd. 1500 mal größer als die eines Delphins. Zu ähnlichen Verhältniszahlen kommt Hill (1950), der das Körpergewicht (D = 100 kg, Wal = 100 t) zugrunde gelegt hat.

Da die erforderliche mechanische Leistung nur um den Faktor 67 steigt, wäre es für Wale bei dieser Muskelleistung kein Problem den Widerstand auch bei turbulenter Umströmung mühelos zu überwinden. Allerdings ist bisher davon ausgegangen worden, daß die Muskelleistung mit der Muskelmasse linear wächst ohne eine Grenze zu erreichen. Physiologische Untersuchungen haben gezeigt, daß die Muskelleistung, insbesondere bei längerfristigen Beanspruchungen an die Kapazität des Atemapparates, des Herzes und des Kreislaufs gekoppelt ist. Diese Organe und Systeme wachsen aber nicht linear mit der Muskelmasse. So weist Hill (1950) darauf hin, daß die relative Herzgröße für Delphine und Wale gleich ist und bei 0,5 % des Körpergewichts liegt. Es gibt deshalb einen leistungslimitierenden Faktor im Stoffwechsel. Die Stoffwechselintensität oder Stoffwechselrate eines Tieres kann z.B. über den Sauerstoffverbrauch pro Zeiteinheit bestimmt werden und ist ein direktes Maß für die vom Organismus aufgebrachte Leistung. Die Stoffwechselrate R wird häufig auf das Körpergewicht bezogen und kann somit in allometrischen Gleichungen erfaßt werden. Schmidt-Nielsen (1977) hat Gleichungen für die minimale Stoffwechselrate R in

Abhängigkeit von dem Körpergewicht m_b verschiedener warmblütiger Tiergruppen experimentell ermittelt. Die Gleichung für die Unterklasse EUTHERIA lautet:

$$R = 3.34\ m_b^{0,75} \quad ([R] = \text{Watt},\ [m_b] = \text{kg})$$

Für einen 100 kg schweren Delphin ist demnach R_D = 105 Watt, für einen 100 t schweren Blauwal folgt R_W = 18 782 Watt. Die Werte stehen in dem Verhältnis

$$R_W = 178\ R_D$$

Wegen der direkten Beziehung zwischen Stoffwechselrate und Leistung kann man sagen, daß die Leistung der Wale mindestens 178 mal größer ist als die der Delphine.

Stoffwechselraten unter Leistungsanforderungen sind weniger bekannt, als die o.g. Werte des Grundumsatzes. Hill (1950) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß die Blutversorgung der Wale nur ausreicht, um 1/7 (!) der theoretisch berechneten Muskelleistung zu gewährleisten. Das entspricht der Beobachtung, nach der die relative Muskelleistung mit zunehmender Körpergröße abnimmt (Schmidt-Nielsen, 1977). Berücksichtigt man den Faktor 1/7, dann ändert sich das Verhältnis der Muskelleistung wie folgt:

$$P_{b(W)} = (1/7 \cdot 1520)\ P_{b(D)}$$
$$P_{b(W)} = 217 \times P_{b(D)}$$

Demnach hat ein Wal auch bei 'korrigierter' Muskelleistung noch genug Reserven dem (theoretischen) Widerstand zu begegnen, der bei turbulenter Strömung auftritt. Auf der Basis der oben berechneten mechanischen Leistung besteht eine 2-3fache Reserve. Theoretische Abschätzungen zeigen, bei Verringerung der Körperlänge nimmt die Muskelleistung in Relation zur mechanischen Leistung drastischer ab, so daß ein 11 m langer Wal schon nicht mehr in der Lage ist, den Widerstand zu egalisieren und die hohen Schwimmgeschwindigkeiten erscheinen wiederum paradox, i.S. Grays.

1.3. Übersicht über die Kapitel

Aufgrund dieser Feststellungen drängt sich die Frage auf, ob das Graysche Paradoxon nicht auf einer falschen Einschätzung der bremsenden Kräfte beruht. Wie erwähnt, hat Gray für seine Berechnungen vorausgesetzt, daß die Strömung turbulent ist und die Strömung um den Tierkörper mit seinen Formveränderungen denen an starren Körpern entspricht; Ansätze, die sich aus Sicht der Hydrodynamik zwangsläufig ergaben. Ein kurzer Abriß der theoretischen Strömungsmechanik in Kap. 2. soll dem Leser helfen, diese "Zwangsläufigkeit" nachzuvollziehen.

Bereits für Gray war klar, daß eine laminare Umströmung des Tierkörpers so geringe Widerstände nach sich ziehen würde, daß sie mit der vorhandenen Muskelleistung ohne weiteres zu überwinden wären. In der Zwischenzeit sind verschiedene Beiträge zur Turbulenzvermeidung bei starren Körpern von Biologen und Ingenieuren publiziert worden. Diese Ansätze werden in Kap. 3 referiert.

Mit dieser Arbeit soll untersucht werden, ob die für diese Tiere spezifischen Locomotionsbewegungen, vielleicht in Interaktion mit der Strömung Bedingungen schaffen, welche die Entstehung der Turbulenz oder die Wirkung der Turbulenz vermeiden könnten. In Kap. 4 werden Gemeinsamkeiten hinsichtlich Form und Bewegung innerhalb der Gruppe schnell schwimmender Wirbeltiere aufgezeigt. Da die Untersuchungen an flexiblen Modellen durchgeführt worden sind, wird im Kap. 5 auf die Modellgesetze der Strömungsmechanik eingegangen. Diese Modellgesetze regeln die Übertragung von Modellergebnissen auf reale Tiere. Die Durchführung der Untersuchung auf der Basis dieser Gesetze wird im Kap. 6. beschrieben. Im Anschluß daran erfolgt der Befundteil im Kap. 7. mit der Interpretation der Ergebnisse.

Theoretische Strömungsmechanik für starre Körper

Ein Körper, z.B. ein Fisch, welcher in hinreichender Tiefe durch das Wasser gleitet, verändert das ihn umgebende Wasser. Dabei "erzeugt der Körper eine Störung im Strömungsfeld derart, daß sich die "Stromlinien" hinter dem Körper nicht in idealer Weise wieder schließen" (Nachtigall, 1977).
In der Abb. 3 sind die Stromlinien skizziert, die der Richtung der Geschwindigkeit der Wasserteilchen um einen starren Haifischkörper entsprechen. Das Wasser wirkt auf den Körper, denn das Fluid bleibt an der Oberfläche des Körpers haften. Die Strömung eines Körpers läßt sich demnach in zwei Strömungsbereiche gliedern:

a) oberflächennahe Grenzschicht
b) 'reibungslose' Außenschicht
(Prandtl, 1904)

1. Grenzschicht

In der dünnen Grenzschicht wirken die Reibungskräfte, welche von der Viskosität des Fluids abhängen. Wegen der Haftbedingung (Adhäsion) wird sich die Geschwindigkeit der Wasserpartikel in Schichten mit zunehmendem (wenn auch kleinem) Abstand vom Körper ändern.

Das Strömen in Schichten bedeutet, daß die innere Reibung zwischen den Partikeln des Mediums überwunden worden ist. Das ist jedoch nur unter Energiezufuhr möglich. Die Kräfte, die die innere Reibung überwinden helfen, werden als Reibungskräfte bezeichnet, so daß die Grenzschicht auch den Namen Reibungsschicht trägt. Die Reibungskräfte wiederum sind u.a. von der Grenzschichtdicke δ, der Rauhigkeit der Oberfläche und dem Strömungszustand, der laminar oder turbulent sein kann, abhängig. Die Grenzschichtdicke δ nimmt mit zunehmender Lauflänge in Körperlängsrichtung zu (Abb. 4). Dennoch bleibt sie für

strömungsgünstige Formen über deren ganze Länge dünn, begrenzt durch eine "Außenströmung".

2.2. Außenströmung, hydrodynamischer Druck

Der angeströmte Körper lenkt die Partikel von ihrer gradlinigen Bahn ab, wie am Bild der Strömungslinien zu erkennen (Abb. 3). Die Ablenkung erfordert eine Kraft, die für die Beschleunigung der Partikel aufgewendet werden muß. Vor der Beeinflussung durch den Körper betrug die kinetische Energie der sich mit der Geschwindigkeit v_0 bewegenden Strömung:

$$E_{kin} = 1/2\, m\, v_0^2 \quad : m = m_{(Wasser)}$$

Durch die Umlenkung aufgrund des Körpers werden die Partikel zu einer Geschwindigkeit v_1 beschleunigt, ihre Zu- oder Abnahme an kinetischer Energie E_{kin} lautet jetzt:

$$E_{kin} = 1/2\, m\, (v_0^2 - v_1^2)$$

Der umströmte Körper verspürt die Bewegungsenergie in Form einer senkrecht zur Oberfläche wirkenden Kraft, dem hydrodynamischen Druck, p^*. Für den Fall, daß die Geschwindigkeit v_0 auf Null reduziert wird, verwandelt sich gemäß des Energiesatzes die gesamte Bewegungsenergie in potentielle Energie, E_{pot}. Das führt zu den relativ höchsten strömungsbedingten Druckkräften am Körper. Im Falle einer Beschleunigung der Strömung wird die Änderung der kinetischen Energie als Druckverminderung perzipiert. Die Resultierende aller Druckkräfte entspricht den bremsenden und Auftrieb erzeugenden Kräften der Außenströmung.

---

* In der Ingenieurliteratur wird diese Größe oft auch als "statischer" Druck bezeichnet.

2.2.1. Bernoulli-Gleichung

Der Energiesatz für von der Schwerkraft unbeeinflußte und stationäre** Strömungen wird Bernoulli-Gleichung genannt und lautet:

$$p + 1/2\ \rho\ v^2 = p_{ges} = \text{const.}$$

p = hydrodynamischer Druck

p_{ges} = Gesamtdruck

Die Bernoulli-Gleichung stellt eine Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Druck her. Der Gesamtdruck p_{ges} ist konstant, so daß die Vergrößerung eines Summanden Verminderung des anderen mit sich bringt; mit anderen Worten: Strömungsgeschwindigkeit und strömungsdynamischer Druck sind invers verknüpft.

Die Bernoullische Gleichung darf nur auf Ereignisse in der Außenströmung angewendet werden.

2.2.2. Druckbeiwert c_p, Druckverteilung

In der Strömungsmechanik wird anstatt des absolut gemessenen Druckes häufig der Druckbeiwert c_p als Parameter berechnet, da der Beiwert eine Größe ist, die losgelöst von der im Experiment gewählten Geschwindigkeit die Charakteristika seiner Kenngröße beibehält.

Aus der Energiegleichung

$$1/2\ \rho\ v_\infty^2 - p_\infty = 1/2\ \rho\ v^2 - p$$

folgt

$$p - p_\infty = 1/2\ \rho\ v^2 \left(1 - \frac{v^2}{v_\infty^2}\right)$$

Der linke Term wird als Druckbeiwert c_p bezeichnet

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{1/2 \rho v^2}$$

** Näheres über den Begriff "Stationäre Strömung" in Kap. 5

In Strömungen, deren Gesamtdruck konstant ist, liegt der Druckbeiwert c_p in den Grenzen $-\infty < c \leq 1$, denn bei $v = 0$ folgt

$$c_p = 1 - \frac{0}{v_\infty^2} = 1$$

Auch diese Gleichung besagt, daß mit Geschwindigkeitszunahme in der Außenströmung der Druck auf den Körper abnimmt, d.h. der Druckbeiwert sinkt. Für einen starren Delphinkörper läßt sich demnach die in Abb. 5 skizzierte Druckverteilungskurve im Experiment beobachten. Am rostralen Ende ist der Druck am höchsten, sinkt dann wegen der Beschleunigung der Partikel bis auf Höhe des größten Durchmessers ab. Im Anschluß daran wird die Außenströmung wieder verzögert und der Druck steigt wieder an. Verläuft dieser Übergang nicht günstig, so kann die Strömung in der Grenzschicht umschlagen (Kap. 2.4.) oder sich gar ablösen (Kap. 2.6.). Am caudalen Ende ist der Druck, wenn sich die Grenzschicht nicht abgelöst hat, wieder annähernd auf dem Niveau wie an der rostralen Spitze. Die so beschriebene Druckverteilung ist allen "strömungsgünstigen" Körpern eigen.

2.3. Widerstand

Will man Aussagen über die bremsenden Effekte der Strömung auf den Körper machen, so behält die Einteilung der Strömung in zwei Bereiche, Grenzschicht und Außenströmung, ihre Bedeutung bei. Die Ursache der Verzögerung der Bewegung in Schwimmrichtung sind zurückzuführen auf

a) Reibungskräfte der Grenzschicht

b) die Summe der Druckkräfte der Außenströmung

Reibungskräfte und Druckkräfte bilden zusammen den Gesamtwiderstand W_{ges}. Zu welchen Anteilen die Komponenten am Gesamtwiderstand beteiligt sind, läßt sich zunächst nur abschätzen (Abb. 6).

Über die Anteile der Komponenten lassen sich auch Abschätzungen hinsichtlich der Größe des Gesamtwiderstandes machen. Körper, die hauptsächlich Reibungswiderstand aufweisen, so die Stromlinienkörper, sind einem geringeren Widerstand ausgesetzt als eine senkrecht zur Strömung stehende Platte, an der Druckwiderstand vorwiegt. So weist ein 1 m langer Stromlinienkörper von 0,3 m Durchmesser dieselben Widerstandswerte wie ein senkrecht angeströmtes Fünfmarkstück auf.

2.4. Laminare und turbulente Strömung, Umschlag

Im Kap. 1.4. ist darauf hingewiesen worden, daß die Größe des Widerstandes von dem Zustand der Strömung abhängig ist. Eine Strömung wird laminar genannt, wenn die Bewegung der Partikel in Schichten geordnet erfolgt. Treten ungeordnete, senkrecht zu den Schichten verlaufende Partikelbewegungen auf, ist die Grenzschichtströmung turbulent. Die Geschwindigkeitsverteilung in einer laminaren Grenzschicht unterscheidet sich von einer turbulenten (Abb. 7).

Gersten (1974) schreibt dazu: "In einer turbulenten Grenzschicht sind die Geschwindigkeitsprofile völliger und die Wandschubspannungen größer als in einer laminaren Grenzschicht gleicher Dicke". Die größeren Wandschubspannungen vergrößern den Reibungswiderstand enorm, jedoch nicht den Druckwiderstand. Bei gegebener Anströmungsgeschwindigkeit wird "nach einer bestimmten Lauflänge die Strömung in der Grenzschicht instabil, da die in der Strömung beteiligten Reibungskräfte zur Dämpfung der Störungen nicht mehr ausreichen. Es kommt zum Umschlag laminar-turbulent. Hinter dem Umschlag ist die Grenzschicht turbulent" (Gersten, 1974). Obgleich die theoretische Strömungsmechanik die Turbulenzentstehung noch nicht gänzlich zu erklären weiß, ist bekannt, daß beschleunigende oder verzögernde Drücke der Außenströmung auf die Grenzschicht einwirken (Prandtl, Oswatitsch, Weghardt, 1969, S. 200). Die beschleu-

nigte Außenströmung ist insofern von Vorteil, als daß sie ihrerseits beschleunigend auf die Grenzschicht für die Phase der Beschleunigung laminar bleibt. Dieser Effekt ist bis zur Höhe des größten Körperdurchmessers zu beobachten. In der Technik hat man sich diese Erkenntnis zunutze gemacht. Strömungsgünstige Körper haben deshalb den größten Körperdurchmesser relativ weit hinten, sie weisen die sogenannte "Dickenrücklage" auf. Auch bei den schnell schwimmenden Wirbeltieren ist der größte Durchmesser relativ weit schwanzwärts verschoben. Nachtigall (1977) erwähnt, daß bei Thunfischen der größte Durchmesser sogar bis zu 70 % der Körperlänge hinter dem Rostrum liegt.

2.5. Reynolds-Zahl, Re

Es gibt für jeden Körper in Abhängigkeit von einer Bezugslänge l eine kritische Strömungsgeschwindigkeit v_{krit}, bei welcher die Strömung schon nach kurzer Lauflänge turbulent wird. Man kann sagen, daß die meisten Schwimmkörper durch eine Bezugslänge l gekennzeichnet sind. In Verbindung mit einer charakteristischen Größe des strömenden Fluids, der kinematischen Zähigkeit wird die Reynolds-Zahl Re gebildet:

$$Re = \frac{\rho v_0 l}{\eta} = \frac{v_0 l}{\nu}$$

ρ = Dichte
η = Viskosität
ν = kinematische Zähigkeit

Die Reynolds-Zahl ist eine Kennzahl der Strömungsmechanik, mit deren Hilfe entschieden werden kann, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Sie gehört zu den Kennzahlen der Modellgesetze der Strömungsmechanik (Kap. 5.1.).

Es hat sich als sinnvoll erwiesen als Bezugslänge l die Körperlänge L im Falle der schnellen, strömungsgünstigen Körper zu wählen. Man kommt dann für die schnell schwimmenden Wirbeltiere auf Werte, die

im Bereich

$$10^6 < Re < 10^8$$

liegen. Für starre Körperformen, wie die dieser Wirbeltiere gilt nach dem heutigen Kenntnisstand als gesichert, daß Strömungen im Reynolds-Zahlbereich $Re > 10^5$ turbulent sind. Gray (1936) mußte deswegen annehmen, daß die Strömung um einen starren Delphinkörper turbulent ist. Im Falle beweglicher Körper meint Purves (1963): "it would be erroneous to use the total length of an animal in the calculation of Reynold's number". Er schlägt deshalb vor, als Bezugslänge die Projektion des gebogenen Körpers zu nehmen. Dieser Ansatz, den Widerstand auf der Basis wechselnder "Teil-Reynoldszahlen" zu errechnen, hat sich nicht durchgesetzt. Dem Hinweis, die Bezugslänge sei z.B. in den Berechnungen von Gray nicht richtig gewählt, ist jedoch nie widersprochen worden.

2.6. Ablösung

Die Grenzschicht strömt, solange ihre Geschwindigkeit in Strömungsrichtung zunimmt, immer an der Oberfläche des umströmten Körpers entlang. In einer Strömung aber, in der die Geschwindigkeit aufgrund einer Verzögerung abnimmt, kann durch die Umkehr der inneren Teile der Grenzschicht eine Ablösung der Strömung von der Oberfläche und die Bildung von Wirbeln verursacht werden. Mit der Ablösung ist eine drastische Widerstandserhöhung verbunden, die noch ausgeprägter ist als bei turbulenter Strömung. Sie wird sicher eintreten, wenn die Geschwindigkeitsabnahme in der Außenströmung stark genug ist.

Tab. 1: Mögliche Zustände der Strömung um einen Körper

Außenströmung	beschleunigt		verzögert	
Grenzschichtzustand	laminar	turbulent	laminar	turbulent
Grenzschicht	kann umschlagen bleibt anliegend		störungsanfällig, sicher umschlagend	weniger störungsanfällig
			Ablösung sicher	kann ablösen

Eine Ablösung tritt im Bereich des größten Körperdurchmessers auf, wenn "die während der Beschleunigungsphase gewonnene kinetische Energie in der Grenzschicht nicht ausreicht, um das Teilchen gegen den Druckanstieg entlang der Körperoberfläche bis zum hinteren Ende des Körpers strömen zu lassen" (Gersten, 1974). In laminaren Grenzschichten ist diese Bedingung häufig nicht gegeben.

Anders bei turbulenten Grenzschichten. Sie sind energiereicher und können dem kräftigen Druckanstieg besser standhalten, so daß die Gefahr der Ablösung geringer ist als bei laminarer Grenzschicht. Die Wirkung auf den Gesamtwiderstand für verschiedene Strömungen, gültig für unterschiedliche Körperformen, ist in Tab. 2 zu ersehen.

Tab. 2: Der Einfluß der Grenzschichtströmung auf die Widerstände, aufgeteilt nach den Komponenten

		Druckwiderstand	Reibungswiderstand
lam. Grenzsch.	ohne Ablösung	klein	klein
	mit Ablösung	sehr groß	klein
turb. Grenzsch.	ohne Ablösung	klein	groß
	mit Ablösung	groß	groß

In der Technik hat man sich diese Beobachtungen zu Nutze gemacht, indem vor ablösungsgefährdeten Gebieten künstlich eine turbulente Strömung erzeugt wird. Es gibt Beobachtungen nach welchen sich bei Scombriden auf Höhe der Kiemen ein "corselet of scales" befindet (Walters, 1962). Dieses "corselet" wird in einen Zusammenhang mit einer frühzeitigen Turbulenzerzeugung gebracht, mit dem Ziel der Nicht-Ablösung. Eine Analogie zur Technik ist fragwürdig, da in der Technik Lösungen von Problemen an starren Körpern gesucht werden, die Tiere hingegen ihre Form ständig ändern.

3. Theorien zur Turbulenzverminderung

Im Kap. 2 sind Gründe aufgeführt worden, warum es bei starren Körpern, deren Form denen der schnell schwimmenden Wirbeltiere ähnlich sind, zu einem Umschlag von anfänglich laminarer Strömung zur Turbulenz kommt. Die turbulente Strömung bzw. die damit verbundenen Widerstandswerte begründen das Graysche Paradoxon (Kap. 1.2.). Eine laminare Strömung würde zur Klärung des Paradoxons ausreichen. Es stellt sich die Frage, ob die schnell schwimmenden Wirbeltiere die Strömung trotz der großen Lauflänge doch laminar halten können und wenn ja, auf welche Art und Weise. Wegen der caudalen Lage des größten Durchmessers bleibt die Strömung über eine weite Distanz hinter dem Rostrum laminar. Das gilt jedenfalls für die Gleitphase, dürfte aber auch während der Antriebsbewegungen so sein, da die Tiere nur den Schwanzstiel bewegen (Kap. 4.2.2.).

3.1. Delphinhaut

Zu den geläufigen Theorien über die Vermeidung von Turbulenzen gehört die von Kramer (1960). Kramer entwickelte ein Patent, mit welchen der Widerstand starrer Körper, wie Torpedos oder Raketen vermindert

werden kann und sieht zwischen seinem Patent und der Delphinhaut eine Beziehung. Die technische Version ist zusammengesetzt aus einer Außenhaut, die über Noppen aus Weichgummi mit einer festen Innenhaut verbunden ist. Zwischen den Noppen befindet sich eine Flüssigkeit. Diese Anordnung vermindert den Widerstand, indem die Störungen in der Strömung gedämpft werden.

Die Delphinhaut besteht, wie jede Säugerhaut, aus dem Corium und einer gut ausgebildeten Epidermis (Abb. 8a). Die Epidermis ist ein lockeres, sehr wasserreiches Gewebe mit viel extrazellulärem Wasser, das nach außen von einer dünnen, aber sehr zähen Membran abgedeckt ist, dem Stratum semicorneum. Das Corium reicht mit Zapfen (Coriumpapillen) und Leisten in die Epidermis (Nachtigall, 1977). Da mit der künstlichen Dämpfungshaut im Experiment Widerstandsverminderungen nachgewiesen worden sind, schließt Kramer analog, daß die Delphinhaut in ähnlicher Weise funktioniert. Nachtigall (1977) ergänzt "eine Verminderung des Widerstandes könnte passiv (Dämpfung) oder aktiv (Flüssigkeitsbewegungen über Hautmuskelkontraktionen) geschehen. Im letzten Fall ergäbe sich der Vorteil, daß der Delphin durch neuromuskuläre Koordination "vorfühlen" und sich ausbreitenden Grenzschichtturbulenz durch gesteuerte Amplituden und phasenangepaßte Hautschwingungen wegdämpfen konnte. Somit scheint der Delphin gegenüber einem geometrisch gleichen technisch starren Körper dadurch im Vorteil zu sein, daß er über Mittel verfügt, die Grenzschicht bis weit ins Gebiet des Druckanstiegs (Heckregion) hinaus laminar zu halten und durch "Störstellen" induzierte Turbulenzen wegzudämpfen".

Detaillierte anatomische Studien der Haut von Zahnwalen (Stenella frontailis, Stenella longirostiris, Pseudorca crassides) haben gezeigt, daß die Papillen der Fettspeicherung dienen und in Abhängigkeit von der Jahreszeit variieren (Sokolov, 1973). Es ist nun schwer vorstellbar, daß eine so wichtige Struktur erheblichen Schwankungen unterworfen sein darf, da der Effekt auf die Strömung dann zeitweise beeinträchtigt würde.

.2. Haifischhaut

Die mit Hautzähnchen überzogene Haifischoberfläche wird ebenfalls mit der Turbulenzvermeidung in Verbindung gebracht. Reif (1978) hat auf den Zähnchen feine Rillen entdeckt, die sich zu einem System longitudinaler Kanälchen zusammen fügen. Es wird vermutet, daß diese 100 µm breiten und 60 µm tiefen Rillen für die Reduktion des Strömungswiderstandes optimiert sind. Aus hydrodynamischer Sicht jedoch ist das wenig wahrscheinlich. Die Grenzschichtdicke wächst bei einer ebenen Platte 1,80 m hinter dem Rostrum auf 31,61 mm an (Nachtigall, 1977). Die Rillen sind im Vergleich dazu rund 600-fach kleiner und ihre Wirkung auf die Grenzschicht somit unbedeutend (Hoerner, 1965), wenn man die Haifischoberfläche allein nach dem Grad der Rauhigkeit beurteilt. Wie in Abb. 8b zu sehen ist, sind die Zähnchen allerdings nach hinten gebogen oder tragen sogar Platten, so daß sie nicht nur als spitze Kegel in Strömung hineinragen. Reif selber weist auf den noch ausstehenden Nachweis durch Experimente hin.

Eine Verschiebung der Hautoberfläche gegen das Corium, wie bei den Delphinen erscheint unwahrscheinlich, denn die Haifischhaut ist sehr eng mit den Myomeren verwachsen und wird als "äußere Sehne" mit der Kraftübertragung in einen funktionellen Zusammenhang gebracht (Wainwright, 1978).

.3. Hautoberfläche bei Knochenfischen

Die Knochenfische weisen wiederum eine andere Oberflächenstruktur als die Delphine oder Haie auf. Unter der Epidermis sind zwar Schuppen eingelagert, denen aber keine Strömungsbeeinflussung zugeschrieben wird. Vielmehr soll es der Schleim sein, der den Energieverlust beim Schwimmen niedrig hält. Wie das Polyäthylenoxid in der Technik, so sollen die den Schleim bildenden Glycoproteine die Turbulenzbildung

verhindern. Rechenberg u. Bienert (1978) meinen, unter der Voraussetzung, daß "die Turbulenz einer Wandgrenzschicht aus dem Zerfall von Längswirbeln (Taylor-Görtler-Wirbel) hervorgeht, könnten hier Fadenmoleküle die Ausbildung der Längswirbel und ihren turbulenzerzeugenden Zerfall erschweren".

Aus ihrer Arbeit ist zu entnehmen, daß Beimengung von langen Kettenmolekülen in strömende Wasser zur Widerstandsverminderung bei starren Körpern geführt hat. Untersuchungen von Rosen u. Cornfort (1971) hingegen zeigten, daß speziell der Schleim von Scombroiden untauglich für eine Verminderung der Reibung ist. Versuche an Hechten mit und ohne Schleimüberzug haben Kempf u. Neu (1932) schon zu der Überzeugung kommen lassen, daß eine Reduktion der Reibung durch makromolekulare Substanzen schwer nachweisbar ist.

Außerdem muß gefragt werden, wie hoch die Anforderung an den Stoffwechsel für die stetige Produktion des Schleims ist. Auch hierfür wird Energie benötigt. Weiterhin ist zu fragen, ob die Länge der Makromoleküle ausreicht, um z.B. in einer Grenzschicht von 31,61 mm Dicke wirksam zu werden.

Es scheint mir zweifelhaft, ob diese unterschiedlichen Mittel zur Turbulenzvermeidung ausreichen. Hingegen scheint es sinnvoll zu prüfen, ob der Umschlag zu einer energieaufwendigeren Strömung durch Merkmale verhindert werden kann, die allen diesen ansonsten stammesgeschichtlich verschiedenen Tieren gemeinsam sind. Die Gemeinsamkeiten erstrecken sich sowohl auf die Gestalt, als auch auf die Bewegungsweise.

4. Gemeinsamkeiten der schnell schwimmenden Wirbeltiere

Trotz der unterschiedlichen Klassenzugehörigkeit (Kap. 1.1.) sind die Übereinstimmungen der Gestalt und der Bewegung verblüffend. Offenbar liegt bei Tieren mit hohen Schwimmgeschwindigkeiten auf diesen Merkmalen ein ganz erheblicher Selektionsdruck. Da es sich vorwiegend um Räuber handelt, liegt die Vermutung nahe, daß hohe Schwimmgeschwindigkeiten

mit dem Beutefang in Verbindung stehen. Magnuson (1977) ist der Ansicht, daß die Konkurrenz zu den Artgenossen den Selektionsmechanismus darstellt: "In feeding schools food is only available in presence of other competitors and the development of a fast feeding attack may have evoled in response to getting there first, rather than catching up with the pray per se."

4.1. Körpergestalt der schnell schwimmenden Wirbeltiere

In der Abb. 1 ist die Übereinstimmung der äußeren Körpergestalt dieser Tiere gut zu erkennen. Die Erläuterung im Kap. 2.4. haben gezeigt, daß die Form des Rumpfes auf einen funktionell-morphologischen Zusammenhang schließen läßt. So wirkt die Dickenrücklage vorteilhaft, denn die Grenzschicht bleibt länger laminar.

Der Schwanzstiel ist im Vergleich zum Rumpf schlank. Dadurch wird dem Wasser während der Auslenkbewegung des Schwanzstiels wenig widerstandserzeugende Fläche entgegengesetzt und dadurch die Gegenbewegung des Rumpfes auf ein Minimum reduziert, da relativ geringe Massen bewegt werden. Hinzu kommt, daß der hintere Schwanzstiel einen oder zwei Kiele trägt, die bei Fischen lateral, bei Delphinen dorsoventral angeordnet sind. Der Schwanzstiel ist so schmal, daß nur noch Wirbelsäule und Sehnen, aber wenig Muskulatur Platz finden (Abb. 9). Das in der Schlagebene langgestreckte Profil des Schwanzstiels bietet der Muskulatur auch lange Hebelarme. Indessen sind die Kiele reine Haut- und Bindegewebsbildungen (Lamna, Tursiops).

Die Entwicklung der V-förmigen oder halbmondförmigen Fluke steht ebenfalls in einem funktionell-morphologischen Zusammenhang. Das Vorkommen von schmalen Lappen anstatt einer großen Fläche ist hier kein Nachteil für die Schuberzeugung. Die hohen Schwimmgeschwindigkeiten werden im Gegenteil erst durch diese Formen des Antriebsorgans ermöglicht, da sie den Antrieb durch Ausnutzung des "Auftriebsprinzips" ermöglichen (Nachtigall, 1977).

Die Schubproduktion nach dem Auftriebsprinzip nutzt die hydrodynamischen Auftriebskräfte aus und ist in der Technik u.a. an Schiffsschrauben verwirklicht. Diese Kräfte entstehen an Körpern, die im Winkel zur Körperlängsachse angeströmt werden. Die Strömung fließt dann an der Ober- und Unterseite verschieden schnell, führt also zu unterschiedlichen hydrodynamischen Drücken. Die Differenz zwischen ihnen führt zum hydrodynamischen Auftrieb, der senkrecht zur Anströmrichtung wirkt, aber nicht notwendigerweise nach oben (Abb. 14). Gleichzeitig tritt an dem Profil ein Widerstand auf. Beide Kräfte interagieren und führen zu einer resultierenden Kraft, die ihrerseits eine Schubkomponente T_s aufweisen kann. Durch die tragflügelförmige Profilierung des Körpers wird die Entstehung des dynamischen Auftriebs gefördert und arbeitet bei vergleichsweise hohem Wirkungsgrad.

Die Lappen der Fluke aller schnell schwimmenden Wirbeltiere entsprechen dieser Anforderung. Die Bewegung der gesamten Fluke, in Bezug auf die relative Anströmrichtung ermöglicht während eines Zyklus eine stetige Schubproduktion. Die Entwicklung dieser Fluke bei Säugetieren, bei gleichzeitiger Rückbildung der hinteren Extremitäten kann als besonders prägnantes Lehrbeispiel für konvergente Entwicklung in der Evolution gelten.

Der Schub T_s muß so groß sein, wie oder größer als die bremsenden Wasserkräfte W_{ges}, die am Körper angreifen. Die Wirbelsäule steht deshalb in axialer Richtung unter einer Druckspannung. Sie ist wegen der Wirbelkörper nicht kompressibel, läßt wegen der vielen Zwischenwirbelgelenke jedoch Beweglichkeit des Schwanzes zu.

In der Abb. 10 ist der zeichnerische Versuch unternommen worden, die auf die Wirbelsäule wirkenden Kräfte zu erfassen. Dazu ist exemplarisch eine Position der Schwanzbewegung eines Delphins während des Aufschlags ausgewählt worden; dieses gilt entsprechend für den seitlichen Aufschlag des Fischschwanzes. Der Schub T_s wirkt als äußere Kraft auf die Fluke. Die Kraft der Muskulatur M wirkt dem Schub entgegen, so

daß die Fluke in z.B. dieser Position bleibt. Dieser stationäre Ansatz ermöglicht nun die Abschätzung der Belastung ausgewählter Wirbelsäulenabschnitte. Zu diesem Zweck wird das Krafteck bestimmt:
Man verlängert jeweils die Kraftwirkungslinien (M bzw. T_s) bis sie sich schneiden. Dann verlegt man den Ursprung der Kraft T_s in diesem Schnittpunkt. Da vorausgesetzt worden ist, daß sich die Kräfte im Gleichgewicht befinden, erzeugen sie im Gelenk keine Bewegung, d.h. die Resultierende dieser Kräfte muß durch das Gelenk verlaufen. Die Richtung dieser resultierenden Kraft ist durch die Verbindungslinie vom Gelenk zum Schnittpunkt der beiden Kräfte M und T_s bestimmt. Der Betrag der Resultierenden entspricht dem Abschnitt, der durch Parallelverschiebung der Kraft M und die Strecke T_s auf der Richtungslinie abgegriffen wird.

Dieses Verfahren der quasi-statischen Behandlung der Kräfte erlaubt also die Bestimmung von Richtung und Größe der in einem Gelenk, bzw. in dem zwischen zwei Gelenken liegenden Skelettstück, in diesem Fall in den Zwischenwirbelgelenken und in den Wirbelkörpern. Ähnliche Berechnungen für die Wirbelsäule von Landtieren finden sich bei Preuschoft (1976) sowie Preuschoft und Fritz (1977). Es ist bemerkenswert, daß die Beanspruchungen der Wirbelsäule bei den wasserlebenden Tieren von gleicher Art ist wie bei Landtieren (DuBois et al., 1974).

Nach der Theorie von Pauwels (1960, 1965) müßten die caudalen Wirbelkörper kleinere Querschnittflächen haben als die mehr cranial liegenden, weil auf sie geringere Kräfte wirken. Bei Zahnwalen, die zwischen 45-50 Wirbeln aufweisen, verringert sich die Fläche der Wirbel erst im letzten Viertel des Schwanzes (Abb. 11b).

In der Wirbelsäule eines Ichtyosauriers sind die Wirbelkörper im hinteren Schwanzbereich im Durchmesser kleiner als auf Höhe der Rückenflosse. Die Schwanzwirbel davor sind augenscheinlich von gleicher Fläche wie die des Lendenwirbelbereichs, diese sind ausgedehnter als die der Leibeshöhle. Das könnte damit zusammenhängen, daß die Muskelkontrak-

tionen, welche die Bewegungen des Schwanzstiels auslösen und damit gleichzeitig Druck in der Wirbelsäule erzeugen, auf den Bereich am Ende der Leibeshöhle beschränkt sind. Weiter cranial liegt auf der Wirbelsäule das Druckkräftepaar, das zwischen Antriebsorgan und Widerstand auf dem Körper besteht. Wegen der myomeren Muskelanordnung bei Fischen, ist eine Übertragung dieses Prinzips der Säugetiermuskeln im einzelnen noch nicht erforscht.

4.2. Bewegungen

Außer der vergleichbaren äußeren Körperform haben die schnellen Schwimmer eine nahezu übereinstimmende Bewegungsform entwickelt, für welche gleichfalls ein äußerst wirksamer Selektionsmechanismus vermutet werden muß.

Die unterschiedliche Bewegungsebene des Schwanzes, bei Fischen lateral, dorso-ventral bei Säugern, ist nicht wesensverschieden. Beiden Bewegungsvorgängen ist gemeinsam, daß sie in einer senkrecht zur Vortriebsebene stehende Richtung schlagen.

Die folgenden Angaben zur Kinematik gelten für alle schnell schwimmenden Wirbeltiere in fast gleicher Weise. Die Daten der Literatur werden durch eigene Daten ergänzt.

Sieht man diese Tiere schwimmen, fällt auf, daß in der Hauptsache der Schwanzstiel und die Fluke hin und her bewegt werden, während der vordere Körperteil nahezu starr bleibt. Dies steht im Gegensatz zu vielen anderen Fischen (Aal , Kabeljau), bei denen deutlich sichtbar Wellen über den gesamten Körper laufen. Ursache der Formveränderung ist in allen Fällen die Kontraktion der lateralen Muskulatur, respektive der dorsalen und ventralen bei den Delphinen. Die Anordnung der Muskulatur (segmentale Myomere bei Fischen und Reptilien, umgebildete Rücken- und Bauchmuskulatur bei den Cetacea) ist völlig verschieden, bringt aber gleiche Leistungen hervor (Purves, 1963).

Wellenbewegung

Zur genauen Beschreibung des Bewegungsvorgangs ist es nötig, diesen auf Filmen festzuhalten, da bloßes Beobachten die Gefahr des Wechsels des Bezugssystems nicht ausschließt und schnelle Bewegung nicht hinreichend auflöst. In ruhendem oder erdfestem Bezugssystem werden Größen wie z.B. Schwimmgeschwindigkeit und Anströmwinkel ermittelt. Bei der Analyse von Teilbewegungen z.B. der Weg-Zeit-Kurve eines Punktes auf der Fluke ist immer die Komponente "Schwimmgeschwindigkeit" enthalten, die nur dann eleminiert werden kann, wenn ihre Richtung und Größe bekannt sind.

Soll hingegen die Formveränderung des Körpers erfaßt werden, bietet sich der Wechsel des Bezugssystems an. Ist das Bezugssystem körperbezogen, so gilt die Kurve der Abb. 12. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, daß der Körper eine Wellenbewegung ausführt, denn zwei hintereinanderliegende Körperpunkte erreichen ihr jeweiliges Maximum phasenverschoben. Im Falle gleichzeitigen Erreichens der maximalen Auslenkung aller Körperpunkte handelt es sich um eine "Schwingung". Die Körperwelle ist durch die Schwingungsdauer T_b und die Wellenlänge λ_b bestimmt. Geeignet verknüpft ergeben sie die Körperwellengeschwindigkeit

$$v_b = \lambda_b T_b^{-1}$$

Die Schwingungsdauer T_b ist gleich der Zeit, die der Körperpunkt für einen Zyklus ("Auf" und "Ab", "Hin" und "Her") benötigt. Der reziproke Wert ist die Frequenz

$$\omega = T_b^{-1}$$

Angaben über die Körperwellengeschwindigkeit sind im körperfesten Bezugssystem und Schwimmgeschwindigkeiten U_0 im erdfesten Bezugssystem gemacht. Im körperfesten System erscheint der Schwimmvorgang als Anströmung mit der Geschwindigkeit $-U_0$. Die Beträge von v_b und U_0

sind verschieden. Das Verhältnis zwischen ihnen wird für nicht-scombroide Fische mit

$$0{,}65 < v_o/v_b < 0{,}7$$

angegeben (Videler u. Wardle, 1978)

In einer Veröffentlichung von Wardle u. Videler (1980) wird das Verhältnis für Scomber scombrus mit $v_o/v_b = 0{,}86$ genannt, ein Wert, der sich nur auf wenige Individuen stützt. Die bisherigen Ausführungen deuten an, daß für eine kinematische Beschreibung der Körperbewegungen von wasserlebenden Wirbeltieren folgende Variable von besonderem Interesse sind:

$$v_o \, , \lambda_b \, , \omega$$

Diese Variablen werden in den Experimenten verwendet.

4.2.2. Scombridiforme Bewegungsweise

Breder (1926) hat die Fischbewegungen in Klassen eingeteilt. Die Grundlage dazu ist das Verhältnis von Körperwellenlänge zur Körperlänge L. Tiere bei denen das Verhältnis

$$\lambda_{b/L} \leq 2$$

beträgt, werden in die Bewegungsklasse "carangiform" eingeordnet, benannt nach der Stachelmakrele Caranx. Auf die Tatsache, daß diese Einteilung recht grob ist, macht Webb (1975) aufmerksam: "Many pelagic fish, originally classed as carangiform by Breder (1926), contain more than one-half wavelength within the length of the body, and sometimes more than a complete wavelength.

Folgt man Breder, so setzt man voraus, daß der gesamte Körper in die Wellenbewegung einbezogen ist. In diesem Falle bedeutet $\lambda_{b/L} \leq 2$, daß zu einem bestimmten Zeitpunkt mindestens eine halbe Welle auf dem

Körper "abgebildet" ist*. Dies trifft auf die hier angesprochenen schnellen Schwimmer nicht zu. Lighthill (1970) beschreibt, daß die Schwanzlänge ohne deutlich erkennbaren Ursprung im mittleren Körperbereich beginnen. Es ist also nicht der gesamte Körper in die Lokomotion einbezogen, folgerichtig kann die Körperlänge hier nicht zu der von Breder vorgeschlagenen Klassifikation herangezogen werden. Beobachtungen haben aber dennoch gezeigt, daß die Schwanzbewegungen dieser Tiere wellenförmigen Charakter aufweisen (Kap. 6.6.).

Dieser neuen Erkenntnis Rechnung tragend, soll im weiteren für die Bewegung der schnell schwimmenden Wirbeltiere der Begriff "scombridiforme" Bewegung benutzt werden, denn viele Arten aus der Familie der Scombroidae zählen zu den schnellen Schwimmern. Neben der Bewegungsform sollen ebenso Besonderheiten der Morphologie angesprochen werden. Lighthill (1970) sieht in der Verknüpfung von "halbmondförmiger" Fluke und der Körperbewegung den "culminating point of progress of improvement of speed and efficiency." Es wundert daher auch nicht, daß im Laufe der Evolution diese Art der Kopplung von schnellen Schwimmern verschiedener Entwicklungslinien konvergent entwickelt worden ist.

Die maximale Auslenkung der Fluke, gemessen an der Basis senkrecht zur Vortriebsebene, wird im weiteren Amplitude A genannt. Sie ist nach Hunter u. Zweifel (1971) von der Geschwindigkeit v und der Frequenz ω unabhängig. Allein auf die Körperlänge L bezogen, lautet das Verhältnis mit hoher Regelmäßigkeit für

$$A/L = 0{,}21$$

Die Frequenz ω (Anzahl der Schwanzlänge pro Sekunde) wird allgemein als der die Schwimmgeschwindigkeit v_0 bestimmenden Faktor angesehen. Zu den wenigen Berichten, die Frequenz und Schwimmgeschwindigkeit zusammen berücksichtigen, gehört der von Yuen (1966) speziell für

---

* rein rechnerisch bedeutet $\lambda_{b/L} \leq 2$ es müßte sich eine halbe Welle auf dem gesamten Körper abbilden

Scombroiden bis zu einer Körperlänge von L = 0,6 m. In der Abb. 13 ist die Regressionsgrade für den Thunfisch Euthynnus pelamis angegeben. Die dazugehörige Regressionsgleichung lautet

$$\upsilon_0 = 2{,}053 + 0{,}479\,\omega \qquad [\upsilon_0] = Ls^{-1}$$

Grenzwerte der Anzahl der Schwanzschläge werden nicht genannt. Die Frequenzangaben sind stets mit einem erheblichen Fehler behaftet, der auf das Verhalten der Tiere zurückgeht. Veranlaßt man Haie oder Delphine zum schnellen Schwimmen, indem man ihnen Futter anbietet, beschleunigen sie sich mit nur 2-3 sehr schnell ausgeführten Schwanzbewegungen, um dann mit gestrecktem Körper durch das Wasser zu schießen. Die Schläge dauern insgesamt nur den Bruchteil einer Sekunde. Wenn man dann auf eine volle Sekunde umrechnet, erhält man hohe Frequenzen, die sich aber rechnerisch ergeben und nicht mit der in der Natur beobachteten Anzahl von Schwanzschlägen pro Sekunde übereinstimmen. Woodcock (1948) berichtet, daß Delphine von unbekannter Länge bei einer Frequenz von $\omega = 2\,Hz$ Geschwindigkeiten von $\upsilon_0 \sim 10$ Knoten erreichen. Ähnliche Werte sind auch bei Cousteau (1974) nachzulesen. Norris u. Prescott (1961) geben für den Delphiniden Lagenorhynchus obliquidens folgende Zahlen an:

$$\upsilon_0 = 5{,}54\,Ls^{-1},\ \omega = 3{,}9\,Hz$$

Für die hier beschriebenen Haie der Familie Isuridae existieren keine derartige Zuordnungen, so daß bis auf weiteres die Angaben über die Delphine von der gleichen Länge zugrunde gelegt werden. Allen Tieren mit scombridiformer Bewegungsweise ist gemeinsam, daß relativ hohe Schwimmgeschwindigkeiten mit eher niedrigen Frequenzen aufrecht gehalten werden.

DuBois (1975) berichtet von Beschleunigungsmessungen in Bezug auf die Schwanzbewegungen und stellte bei hohen Schwimmgeschwindigkeiten fest, daß die Körperbeschleunigung mit Schwanzbewegungen in nur einer Richtung einhergeht. Eine andere Art der Asymmetrie bezieht sich auf die Schlaggeschwindigkeit selbst. In Abb. 14 ist die transversale Geschwin-

digkeit w während eines Zyklus bei verschiedenen Schwimmgeschwindigkeiten skizziert (nach Magnuson, 1977).

Für Delphine ist ebenfalls ein Unterschied zwischen Auf- und Abschlag beobachtet worden (Möller, 1974). Nach Purves (1969) könnte die mächtigere epaxiale Muskulatur, welche das doppelte Gewicht der hypaxialen aufweist, die Ursache für die schnelleren Aufschläge sein. Der Abschlag wäre dann eine "Leertakt"-Bewegung, die nötig ist, die Fluke für den "Arbeitstakt" in die Ausgangsposition zu bringen. Auf eine Asymmetrie der Bewegungssequenzen deutet auch die Formveränderung der Delphinfluke hin, die beim Aufschlag eine ebene Fläche bildet, aber mit dorsal gebogenen Lappenspitzen abgeschlagen wird (Purves, 1969).

Über die Notwendigkeit unterschiedlicher Geschwindigkeiten während der Bewegungszyklen kann z.Zt. nicht viel gesagt werden, da Kenntnisse über das Strömungsverhalten bei periodischen Formveränderungen fehlen.

Die Schuberzeugung durch die Fluke ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und deshalb soll die Erörterung dieses Vorgangs auf die Darstellung der wesentlichsten Punkte beschränkt werden. Der Schub resultiert in der Hauptsache aus dem hydrodynamischen Auftrieb an der Fluke (Kap. 4.1.). Der hydrodynamische Auftrieb ist eine Funktion des Anstellwinkels α. Der Anstellwinkel α ist eine Resultierende aus dem Anströmwinkel γ und dem Drehwinkel β (Abb. 14). Der Drehwinkel β ist der Winkel zwischen der Vortriebsachse in x-Richtung und der (mathematischen) Sehne der Fluke; er ändert sich ständig. Der Anströmwinkel γ liegt zwischen der Richtung der Resultierenden der beiden Geschwindigkeiten und w sowie der Schwimmrichtung in x-Richtung. "Überlagern sich nun Schwimmgeschwindigkeit v_0, Queranströmung w und Drehung der Fluke, so subtrahieren sich Anströmwinkel γ und Drehwinkel β. Die Differenz beider Winkel nennen wir Anstellwinkel" (Clauss 1968).

Anströmwinkel γ und Drehwinkel β verändern sich innerhalb eines Zyklus. Der Anstellwinkel α führt zur Strömungsablösung, falls er zu

groß wird. Er besitzt ein Optimum, bei dem der hydrodynamische Auftrieb am größten ist. Deshalb muß der Anstellwinkel α nahezu konstant bleiben. Auch hier gibt es technische Entsprechungen, wie z.B. die Rotorblätter eines Helikopters. Damit der Anstellwinkel stets im optimalen Bereich bleibt, ändern sie ständig ihre Stellung um die Längsachse. Wo das Optimum des Anstellwinkels liegt, weiß man aus Experimenten über stationäre Strömungen. Sie liegen im Bereich $10^{\circ} < \alpha < 30^{\circ}$ (Nachtigall, 1977). Möller (1974) deutet die Möglichkeit an, daß bei instationärer Strömung Anstellwinkel von mehr als 40° toleriert werden, ohne daß die Strömung abreißt.

4.3. Eigene kinematische Analysen

Da die Literatur bzgl. Körperwellengeschwindigkeit v_b und Körperwellenlänge λ_b nur grobe Abschätzungen enthält, sind eigens Filme von schwimmenden Delphinen und Thunfischen hergestellt worden und zur kinematischen Analyse herangezogen worden.

4.3.1. Kinematische Analysen der Delphinbewegung

Kinematische Analysen des Delphinschwanzschlags sind von Hertel (1963), Möller (1974) veröffentlicht worden. Da die Autoren hauptsächlich an den Bewegungen der Fluke interessiert waren, beziehen sich ihre Angaben auf Winkelstellung und auf Weg-Zeit-Kurven der Fluke. Aus ihnen lassen sich die für eine Simulation der Bewegung notwendigen Parameter nicht ableiten. Filme von freilebenden Delphinen gibt es von Cousteau sowie von Sporttauchern. Von diesen Filmen, soweit sie mir zur Verfügung standen, waren keine für eine kinematische Analyse geeignet. Entweder war nicht der ganze Körper erfaßt oder die Tiere änderten ihre Richtung, was das Bewegungsmuster ändert.

Es sind daher im Delphinarium des Duisburger Zoo Unterwasserfilme von drei erwachsenen Tümmlern, Tursiops truncatus (L = 2,3 - 2,4 m) hergestellt

worden. Die Tiere konnten sich während dieser Zeit frei und ohne Aufgabenstellung im ~ 20 m langen Becken bewegen. Die Aufnahmen sind von einer Stelle des Beckenbodens gemacht worden, indem die Kamera den Bahnen der Tiere folgte.

Die Analyse der Super-8-Filme ist im Einzelbildverfahren mit Hilfe eines zum Zuschneiden von Filme gebräuchlichen Projektors von Hand durchgeführt worden. Bild für Bild ist die örtliche Veränderung von drei Körperpunkten

Punkt A: Körperpunkt (0,73 x L)
Punkt B: Basis der Fluke (0,92 x L)
Punkt C: Spitze der Fluke

ausgemessen und in Abb. 16a-e als Weg-Zeit-Kurven wiedergegeben.
Es konnten letztlich nur fünf Zyklen für das eigentliche Auswertverfahren herangezogen werden, weil nur diese von Bewegungssequenzen stammten, in der die Tiere geradeaus schwammen. Es sind die Bewegungen von zwei der drei Tiere analysiert worden, vielleicht erklärt das die unterschiedliche Periodendauer $T: 0{,}59 < T < 0{,}72$ s. Sequenzen, in denen sich die Tiere mit 3-4 Schwanzschlägen beschleunigten, dauerten $0{,}22 < T < 0{,}27$ s, sind aber wegen der geringen Aufnahmegeschwindigkeit von 18 Bildern s^{-1} nicht in die kinematische Analyse einbezogen worden.

Die Zeiten für die Dauer (t) des Auf- und Abschlags sind für die Flukenspitze und Flukenbasis gemittelt worden, ebenso die maximale Amplitude, um zu überprüfen, ob diesbezüglich Asymmetrien auftreten.

Flukenspitze $\bar{t}_{auf} = 0{,}28$ s, $\bar{t}_{ab} = 0{,}31$ s, A/L = 0,32

Flukenbasis $\bar{t}_{auf} = 0{,}29$ s, $\bar{t}_{ab} = 0{,}30$ s, A/L = 0,26

Die mittlere Frequenz war 1,72 Hz und wurde nur in einem Fall mit 1,34 Hz unterschritten.

Der Quotient aus Ab- und/bzw. Aufschlags-Zeiten und der auf die Körperlänge bezogene Amplituden ergibt die transversale Geschwindigkeit w. Ein Vergleich der transversalen Auf- bzw. Abschlagsgeschwindigkeit führte zu folgenden statistisch nicht gesicherten Ergebnissen:

Spitze	$w_{auf} > w_{ab}$
Basis	$w_{auf} = w_{ab}$

Die relative Körperwellengeschwindigkeit ergibt sich aus dem Quotient des Abstandes zweier Körperpunkte und der Zeitdifferenz, die zwischen dem Erreichen der jeweiligen maximalen Auslenkung liegt. Hier wurden ein Körperpunkt auf dem Schwanzstiel und die Flukenbasis (Abstand = 0,19 x L) als Referenzpunkte gewählt. Anhand dieser Berechnungen ergaben sich folgende Werte für verschiedene Parameter:

Frequenz	$\omega = 1,7\,Hz$
Körperwellengeschwindigkeit	$1,6 \times L s^{-1} < v_b < 2,3 \times L s^{-1}$
relative Körperwellenlänge	$0,91 < \lambda_b/L < 1,3$
Amplitude der Flukenbasis	$A = 0,26 \times L$

4.3.2. Kinematische Analysen der Bewegungen von Thunfischen

Bewegungsanalysen von Thunfischen behandeln in der Regel das Verhältnis von Schwimmgeschwindigkeit und Amplitude und/oder Frequenz der Schwanzbewegungen (Yuen, 1966, Hunter u. Zweifel, 1971, siehe auch Kap. 4.2.1.). Daten über Geschwindigkeit oder Länge der Körperwelle für die schnell schwimmenden Arten gibt es bis auf die schon erwähnten Ergebnisse von Wardle u. Videler nicht.

Eigene Filme sind von Haien und Thunfischen in den Aquarien der USA

gemacht worden. Anders als in Europa findet man hier große Becken vor. Bei der späteren Betrachtung der Filme stellt es sich heraus, daß die Bewegungsaufnahmen von den Selachiern unterbelichtet waren. Nur die Filme der Bewegungen von Thunfischen, Sarda chiliensis waren für die Analyse geeignet. Die Tiere schwammen mit nahezu konstanter Schwimmgeschwindigkeit ungestört in dem Becken, mehr oder weniger in einem großen Kreisbogen (Ø = 15 x L) und stets in derselben Ebene. Die Aufnahmen sind von außen mit einer ortsfesten Super-8-Kamera (54 Bilder s^{-1}) durchgeführt worden. Die Kamera wurde den Tieren nachgeführt, wenn sie direkt vor meinem Standort den Beckenrand passierten, so daß ich die Körperbewegung beinahe senkrecht von oben sehen konnte.

Die Filme sind im Einzelbildverfahren analysiert worden. Die Schwimmgeschwindigkeit der drei in einer Gruppe schwimmenden Tiere (L = 0,45 - 0,48 m) betrug $\bar{v}_0 = 2 \times L\ s^{-1}$. Da sie häufig die Richtung wechselten sind nur acht Bewegungszyklen für die kinematische Analyse herangezogen worden. Ein Zyklus dauerte $0,44 < T < 0,48$, was 24 - 26 Bildern entspricht. Innerhalb eines Zyklus ist die örtliche Veränderung, senkrecht zur Vortriebsebene, von drei Körperpunkten Bild für Bild bestimmt worden. Wegen der gleichförmigen Schwimmgeschwindigkeit sind die Veränderungen in den acht Analysen beinahe identisch. In Abb. 17 ist eine Weg-Zeit-Kurve exemplarisch für folgende Körperpunkte wiedergegeben:

Punkt A: Körperpunkt (0,56 x L)
Punkt B: Basis der Fluke (0,87 x L)
Punkt C: Spitze der Fluke

Die Steigung der Kurven, die der Geschwindigkeit entspricht, mit welcher der Schwanz seitlich bewegt wird, ist unterschiedlich, je nachdem, ob der Schwanz nach links oder rechts geschlagen wird. Dieses deutet auf eine Asymmetrie der Fische hin. Ob diese Asymmetrie jedoch typisch ist, muß in Frage gestellt werden, da in Gefangenschaft lebende Tiere gefilmt wurden, die sich diese Form der Bewegung angewöhnt haben könnten, insbesondere, da sie einen bestimmten Teil des Beckens zu bevorzugen schienen.

Eine weiterführende kinematische Analyse der Bewegungen des Thunfisches Sarda führte zu folgenden Resultaten:

Frequenz	$\omega = 2{,}2$ Hz
Körperwellengeschwindigkeit	$1{,}66 \times Ls^{-1} < v_b < 2 \times Ls^{-1}$
relative Körperwellenlänge	$0{,}9 < \lambda_b / L < 1$
Amplitude an der Flukenbasis	$A = 0{,}23 \times L$

Ein Vergleich zu den Ergebnissen bei den Delphinen zeigt, daß die Bewegungsmuster der Delphine und Thunfische in eine Bewegungsklasse gehören. Sie entsprechen aber nicht dem, was Breder (1926) über carangiforme Bewegung aussagt. Vielmehr unterstützen sie die Auffassung von Webb (1975), daß die Einteilung von Breder recht grob ist (Kap. 4.2.2.).

5. Strömungen an beweglichen Körpern

Die bisherigen Kapitel behandelten in der Hauptsache die hydrodynamischen Bedingungen beim schnellen Schwimmen mit starrem, gestrecktem Körper. Alle Ansätze gehen also von stationärer Strömung aus. In diesen Strömungen bleiben bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit für jeden Ort an der Oberfläche die gestaltabhängige Geschwindigkeit, also die in der Umströmung und der damit verbundene hydrodynamische Druck zeitlich unverändert. Die Rückschlüsse auf die Bedingungen an beweglichen Körpern haben sich als unzureichend erwiesen. Die Ursache für den Rückgriff ist das Fehlen von vollständigen Kenntnissen über die Hydrodynamik instationärer Vorgänge.

Es ist nicht länger vertretbar, diejenigen Körper in der Erörterung der Widerstandsproblematik schnell schwimmender Wirbeltiere weiterhin auszuschließen, die ihre Form verändern. Die Experimente meiner Arbeit beschäftigen sich deshalb mit strömungsdynamischen Vorgängen an beweglichen Körpern.

Experimentielle Befunde aus der Technik über das Strömungsverhalten oder den Widerstand an beweglichen Körpern finden sich kaum, denn technische Körper sind in der Regel starr, führen aber keinesfalls scombridiform-ähnliche Bewegungen aus. Daher findet man auch keine mathematischen oder experimentellen Ansätze für die Untersuchung des Widerstandes von beweglichen Körpern. Bereits die Wahl geeigneter Parameter stellt ein Problem für sich dar.

Deswegen ist auch die Frage nach dem Gesamtwiderstand für schwimmende Tiere noch nicht befriedigend gelöst. Kempf und Neu (1932) haben tote Fische an eine Schleppwaage gehängt, um den Widerstand zu ermitteln. Dabei wurden die leblosen Körper häufig passiv durch die Strömung in Schwingung gesetzt, ähnlich wie Fahnen im Wind, so daß der gemessene Widerstand Werte erreichte, die auf noch mehr Energieverbrauch schließen ließen, so daß man diese Methode nicht weiter verfolgt hat. Im übrigen gibt es in der Literatur nur Berichte, die eine indirekte Schlußfolgerung auf deren Gesamtwiderstand zulassen. Cousteau (1975) berichtet von Versuchen, bei denen Delphine mit Kameras oder Sendern bestückt wurden, um direkte Bilder vom Leben in der Schule zu erhalten. Die Folge war, daß die so beladenen Tiere nicht in der Lage waren, die zwei Meilen entfernte Gruppe einzuholen oder mit der Gruppe Schritt zu halten, nachdem man die Tiere an die Gruppe herangebracht hatte. Diese Beobachtungen im freien Meer lassen erkennen, daß die Tiere überaus anfällig gegen jegliche Änderung ihrer Gestalt sind. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Strömung normalerweise laminar ist und künstliche Veränderungen an der Körperoberfläche (z.B. aufgeschnallte Kamera) zum Umschlag oder sogar Ablösung der Strömung führen. Obgleich die Kenntnisse über Strömungen starren Körpern keinerlei Hinweise darauf geben, daß bei diesen Reynolds-Zahlen (Kap. 2.5.) laminare Strömung überhaupt möglich ist, hat Gray bereits 1936 die Vermutung geäußert, daß die Formveränderung Ursache für eine Laminarisierung der Grenzschicht sein könnte: "Ob-

servation of the flow of particles past the surface of models similar in form to a fish or a dolphin shows that rhythmical movements, such as are characteristic of the body on the caudal fin of the living animal, exert an accelerating effect on the surrounding water in the direction of the posterior end of the model. An effect of this type may be expected to prevent turbulence in the flow of water past the body". Diese Bemerkung nimmt Bezug auf Beobachtungen der Strömung an Modellen, deren Konstruktion, respektive Bewegungsweise in der Veröffentlichung nicht erläutert wird.

Swanson (1965) beschrieb die Strömungsverhältnisse um bewegliche Fischkörper anhand einer Modellrechnung auf der Basis 2-dimensionaler, oscillierender Platten. Er kommt zu dem Schluß: "The flow field obtained is found never to produce the conditions for boundary layer transition to turbulence because of the undulatory, travelling wave motion." Obgleich es noch zur Diskussion steht, ob der 2-dimensionale Ansatz dem entspricht, was um einen Körper eines Tieres herum hydrodynamisch geschieht, weicht dieses Ergebnis von den Beobachtungen stationärer Vorgänge ab.

Gray (1968) weist ein weiteres Mal auf die Verschiedenheit der Umströmung bei starren und beweglichen Körpern hin und spricht weitere Möglichkeiten der Turbulenzvermeidung an: "In the case of a rigid model towed through the water, much of the resistance is due to the slowing down of the water as it flows past the rear of the model. But the oscillating movement of a swimming animal's tail accelerates water in contact with the tail; this may well reduce of prevent turbulence of flow. There is also another possibility which might be worth investigation. When a rigid body starts from rest, it takes a little time for turbulence to develop. It is conceivable that in the case of a swimming animal the turbulence never materializes, because the flukes revers their direction of motion before it has an opportunity to do so.

Clauss (1968) sieht ebenfalls eine Möglichkeit der Strömungsbeeinflussung durch die Aktionen der Fluke: "Eine weitere Möglichkeit zur Erklärung des Grayschen Paradoxon ergibt sich aus der Betrachtung des Nachstroms des sich bewegenden Körpers: durch geschickte räumliche Zuordnung von Widerstandskörper und Antriebsaggregat kann der Impuls der Strömung hinter dem gesamten System sehr gering gehalten werden. In Experiment und Rechnung konnte nachgewiesen werden, daß der Widerstand eines Systems, bestehend aus Widerstandskörper und Antriebsaggregat dann geringer ist, wenn das Antriebsaggregat hinter dem Widerstandskörper angeordnet liegt", anstatt parallel wie z.B. die Düsen auf den Tragflügeln eines Flugzeugs. Als Grund nennt Clauss (1970): "Die vom Widerstandskörper verzögerte Grenzschichtströmung wird vom Propulsionsorgan, d.h. von der Antriebsflosse nachbeschleunigt."

Bisher bezogen sich die Äußerungen vornehmlich auf vermutete Einwirkungen der Bewegung auf die Strömung, ohne den Hinweis, was sich in der Umströmung durch die Bewegung des Körpers ändere. Wu (1977) stellt Vermutungen darüber an, <u>was</u> in der Umströmung veränderlich sein müßte, so daß der Umschlag bei oscillierenden Bewegungen verhindert werden könnte: "I would like to remark that the basic assumption on the equivalence of swimming drag to model drag may not be generally valid. This is because the pressure field around a swimming fish must differ from that about a rigid model, and this difference will fundamentally alter the boundary layer calculation. At an appropriate frequency and phase, the undulatory motion may both delay, the transition to turbulence and flow separation."

Alle Äußerungen haben hypothetischen Charakter. Das ist verständlich, da sich die Erforschung der Ursachen der Turbulenzentstehung noch im Stadium der Hypothesenbildung befindet. Darüber hinaus liegen kaum Erfahrungen über die Turbulenz in instationären Strömungen vor und es ist noch nicht entschieden, wie weit unsere Vorstellungen von Turbulenz aus

stationären Strömungen sich auf instationäre übertragen lassen.

Die einzigen Ergebnisse über die Verteilung des Druckes bei aktiv schwimmenden Tieren, die dem Ansatz von Wu (1977) zuzuordnen sind, liefern die Experimente von DuBois et al. (1974). Die Druckmessungen an lebenden Blaufischen (Pomatomus saltatrix) dienten der Ermittlung des "intramuralen Druckes", waren also nicht mit der Lösung des Umschlagphänomens gekoppelt. In Abb. 18 ist die Verteilung des offenbar über einer Periode gemittelten Druckes wiedergegeben. Es ist zu erkennen, daß der Druck hinter dem größten Körperdurchmesser ansteigt, dann aber wieder zum letzten Meßpunkt hin absinkt. Vergleicht man diese Verteilung mit der Druckverteilung um einen geometrisch ähnlichen starren Körper, so stellt man fest, daß sich in beiden Fällen der Druckverlauf im Schwanzbereich quantitativ unterscheidet. Das Fehlen des Druckanstiegs zum Körperende hin ist aus Sicht der stationären Hydrodynamik negativ zu bewerten, da der Druckunterschied zwischen dem Rostrum und dem Schwanzende auf einen hohen Druckwiderstand hindeutet.

5.1. Ziele der eigenen Experimente

Das wichtigste Ziel meiner eigenen Versuche ist die Antwort auf die Frage, wie und wie weit sich die Strömung um einen Körper, welcher einmal starr ist, ein anderes Mal bewegt wird, unterscheidet. Dazu müssen stellvertretend meßbare Größen ermittelt werden. Die Frage, welche Größen es sein sollen, orientiert sich in diesem Falle an der Problematik des Umschlagverhaltens der Grenzschicht. Die Vermutung von Wu (1977) über die unterschiedliche Verteilung des Druckes liefert einen klaren Ansatz.

In den Experimenten soll deshalb der Frage nachgegangen werden, wie sich der hydrodynamische Druck unter stationären und instationären Bedingungen ändert. Außerdem soll überprüft werden, wie weit das Druckfeld von Frequenz, Phasenverschiebung und Körperform abhängt.

Die scombridiforme Bewegungsweise wurde deshalb gewählt, weil sie:

a) im Zusammenhang mit den für die schnell schwimmenden Wirbeltiere gültige Graysche Paradoxon steht,

b) sich experimentell leichter nachahmen läßt als z.B. eine anguilliforme Bewegung

c) diese Bewegung von den Wettkampfschwimmern in der Schwimmdisziplin "Delphin" kopiert wird und Erkenntnisse eventuell übertragbar sind.

Die Kenntnisse über die Einwirkung der Außenströmung auf die Grenzschicht bieten auch die Möglichkeit durch Messen des Druckes zu untersuchen, ob bei Körpern mit periodischen Formveränderungen das Entstehen von Turbulenz vermieden werden kann. Naturgemäß stehen für die Hypothesenbildung zunächst nur die Informationen über stationäre Strömungen zur Verfügung. Demnach könnte die Turbulenz in einer Strömung verhindert werden, wenn

a) die mittlere Lage des Druckminimums nach hinten verschoben wird,

b) der mittlere Anstieg des Druckes hinter dem Druckminimum verringert wird.

Wenn der Mechanismus der Turbulenzentstehung bei scombridiformer Bewegung derselbe ist, wie bei starren Körpern, können diese Kriterien auch an bewegten Körpern Anwendung finden. Es ist auch denkbar, daß der Mechanismus der Turbulenzentstehung bei scombridiformer Bewegung nicht auf den an starren Körpern beobachteten zurückzuführen ist. Während bei starren Körpern wegen der Interaktion der Außenströmung mit der Grenzschicht ein Umschlagsgebiet existiert (Kap. 2.4.), ist es denkbar, daß an beweglichen Körpern ein Umschlag vermieden wird, weil der Turbulenz nicht die nötige Zeit zur Entwicklung zur Verfügung steht.

Ein weiters Verfahren, das Strömungsgeschehen zu erfassen, ist die Sichtbarmachung der Strömung z.B. durch Farbe. Die Strömung wird im Film festgehalten und kann dann eingehend analysiert werden. Dieses Verfahren wird ebenfalls benutzt.

Es bedarf kaum einer Erläuterung, daß diese Untersuchungen kaum an realen Tieren durchzuführen sind. Dieses ist auch nicht notwendig, weil die Strömungsmechanik Modellgesetze kennt, die eine Übertragung der Modellergebnisse auf den realen Fall ermöglichen. Der Experimentator kann konstante Versuchsbedingungen schaffen. Bei lebendigen Versuchstieren ist schwerlich eine Bewegungskonstanz zu erreichen, denn den Tieren fehlt der innere Antrieb, konstant zu schwimmen.

Schließlich eignet sich der geplante Versuchsaufbau auch zur Bestimmung des Gesamtwiderstandes, dem das Modell in einer Strömung ausgesetzt ist.

5.2. Verwendung beweglicher Modelle

Der Einsatz von Modellen zur Befunderhebung in stationärer Strömung stellvertretend für den realen Fall hat in der Strömungsmechanik Tradition. Auch für den instationären Fall liegt eine Arbeit von Clauss u. Affeld (1968) vor, in welcher von der Untersuchung eines beweglichen Delphinmodells berichtet wird. In dieser Untersuchung ist die Strömung an der Oberfläche, mit besonderer Berücksichtigung der Störstellen (Blasloch, Rückenflosse) untersucht worden. Dabei sind die Modellgesetze aber nicht berücksichtigt worden, so daß eine Übertragung auf den realen Fall unterblieb.

Jede Strömung läßt sich durch bestimmte Kennzahlen charakterisieren. Strömungen, die trotz unterschiedlicher geometrischer und physikalischer Größen gleiche Kennzahlen aufweisen, heißen mechanisch ähnlich. Eine wesentliche Kennzahl ist die im Kapitel 2.5. eingeführte Reynolds-Zahl, Re. In der Modelltechnik wird diese Zahl eingesetzt, wenn starre Körper z.B. Flugzeuge, Gebäude in verkleinerter Form in einem Strömungskanal untersucht werden sollen. Bei konstanter Reynolds-Zahl würde das bedeuten, daß in der Modelluntersuchung die relative Strömungsgeschwindigkeit

v_0 erhöht wird, vorausgesetzt, das Fluid ist gleich. Es ist auch möglich, daß aufgrund der Kennntis der Reynolds-Zahl Untersuchungen an Fischmodellen im Windkanal durchgeführt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit muß dann um den Faktor erhöht werden, mit dem sich die kinematische Zähigkeit von Luft und Wasser unterscheidet.

Eine weitere Kennzahl, die sogenannte "reduzierte Frequenz" wird benötigt, wenn die Strömung um einen Körper mit Formveränderung einem realen Tier mechanisch ähnlich sein soll. Die Definitionsgleichung für die reduzierte Frequenz Σ lautet:

$$\Sigma = \frac{l\,\omega}{v_0} = \frac{l}{v_0\,T}$$

Wie alle anderen Kennzahlen auch, ist die reduzierte Frequenz dimensionslos. Mehr als durch andere Kennzahlen wird hier die Änderung der Strömung mit der Zeit erfaßt, indem der Weg $(v_0 \cdot T)$, der von einem Körper oder Körperpunkt zurückgelegt wird, auch eine Länge l bezogen. Ähnlich wie im Falle der Reynolds-Zahl ist die Wahl einer geeigneten Bezugslänge l eine Sache der Vereinbarung. Für mechanisch ähnliche Körper ist es wichtig, daß die Wahl der Bezugslänge nicht geändert wird. In dieser Arbeit ist sowohl für Reynolds-Zahl wie auch für die reduzierte Frequenz die Körperlänge L als Bezugslänge gewählt worden. Während in der Formel der Reynolds-Zahl die Länge l und die Geschwindigkeit v_0 durch Multiplikation miteinander verknüpft sind, sind sie in der Formel der reduzierten Frequenz als Quotient enthalten. Ist das Modell kleiner als das Original, so ist bei gleicher Reynolds-Zahl und konstanter "reduzierter Frequenz" das Modellergebnis dann für das Original gültig, wenn dessen Frequenz entsprechend geringer ist.

6. Experimentelle Konzeption

6.1. Flexible Modelle

Aus Silikonkautschuk (Wacker RTM 53) wurden von folgenden Tieren maßstabgerechte, flexible Modelle hergestellt (Abb. 19):

Knorpelfisch, hier Lamna nasus, 5:1
Knochenfisch, hier Scomber scombrus, 2:1
Säugetier, hier Tursiops truncatus, 3:1

Die Maße des Haifisches und des Thunfisches wurden von toten Tieren direkt genommen und übertragen. Das Delphinmodell ist nach Angaben von Purves et al. (1975) gestaltet worden. Die Autoren hatten ein Holzmodell für Windkanaluntersuchungen angefertigt. Dieses Modell erweckt den Eindruck eines sehr schlanken Delphins, liegt aber innerhalb der normalen Variationsbreite. Die Körperlänge für alle Modelle betrug L = 0,3 m. Diese Länge war den Dimensionen der Meßstrecke des Wasserkanals angepaßt.

In allen Modellen ist in der median-sagittalen Ebene ein Federblech eingegossen worden. An diesem Blech sind im Schwanzbereich Ösen befestigt, an denen die vom Bewegungsmodul (Kap. 6.3.) kommenden Schnüre verknotet sind. Gleichzeitig dient das Blech der Befestigung des Modells an dem Halterungsrohr, das auf Höhe des Körperschwerpunktes durch das Modell hindurchgeht.

6.2. Wasserkanal

Die Experimente sind in dem Wasserkanal des Instituts für Thermo- und Fluiddynamik der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt worden. Der Wasserkanal ist von geschlossener Bauart (Abb. 20). Die Maße der Meßstrecke sind 0,3 m x 0,3 m x 1,5 m. Die Wände dieser Meßstrecke sind aus Plexiglas, damit die Geschehnisse in der Strömung von außen beobachtbar sind. Ein direkter Eingriff von außen ist nicht möglich. Änderungen am Versuchsaufbau im Kanal sind daher mit Wartezeiten für Ablaufen des Wassers und Füllen verbunden.

Die Strömung wird durch eine Propellerpumpe erzeugt, deren Blätter drehbar sind. Die Strömungsgeschwindigkeit ist abhängig von den Anstellwinkeln der Blätter. Die Anstellwinkel sind stufenlos stellbar. Die Kanalgeschwindigkeit reicht bis $v_k = 15\ ms^{-1}$.

6.3. Apparatur zum Bewegen des Modells

In Vorversuchen ist eine Apparatur zur Simulation der Schwimmbewegungen am flexiblen Modell entwickelt worden. Das Prinzip der Konstruktion ist schon 1968 von Ingenieuren der TU Berlin entwickelt worden; die persönliche Kontaktaufnahme mit einem der Mitarbeiter ermöglichte die Weiterverwendung. Das Bewegungsmodul (Abb. 21) ist zusammengesetzt aus einem elektrischen Motor, der stufenlos regelbar ist und einem Getriebe, das Rotationsbewegungen in Translationsbewegungen umwandelt. Der Motor treibt mittels eines Keilriemens ein System von Zahnrädern an, die gegeneinander verstellbar sind. Die Bewegung der Zahnräder wird auf 2 exentrisch gelagerte Stangen übertragen, an deren Enden hochbelastbare Dacron-Schnüre befestigt sind. Das Modul befindet sich außerhalb des Kanals, deshalb sind Dichtungsprobleme beim Durchführen der Schnüre durch die Wände der Meßstrecke zu bewältigen. Die translatorische Bewegung wird in den Bohrungen der Wand von 12,5 cm langen Stahlwellen übernommen, die sich gut in Dichtungen einpassen. Innerhalb des Kanals stellen dann wieder Schnüre die Verbindung zum Modell her.

Das Bewegungsmodul erlaubt die unabhängige Verstellung der Amplitude und der Phase, während die Frequenz gleichbleibt. Die Konstruktion aus Zahnrädern und Gestänge ermöglicht die Nachahmung einer Schwanzbewegung, bei welcher die zeitliche Asymmetrie innerhalb eines Zyklus realisiert ist, in Analogie zu der Beobachtung bei der Delphinschwanzbewegung (Kap. 4.2.2.).

6.4. Modellarretierung

Die Modelle waren mittels eines Halterungsrohres (Ø = 8 mm) im Wasserkanal befestigt. Die Stange verlief senkrecht zur Strömungsrichtung in der Schlagebene und durchbohrte das jeweilige Modell 40 % der Körperlänge hinter dem Rostrum, in Höhe des Körperschwerpunktes. Die Makrelen- und Haifischmodelle waren in ihrer natürlichen Schwimmhaltung angebracht. Das Delphinmodell hingegen muß um 90° um seine Längsachse gekippt werden, da die Anordnung der Schnüre die Bewegungsebene festlegt. Durch die Drehung war die Flexion des Schwanzes nach dorsal mit der relativ schnelleren Bewegung des Moduls gekoppelt.

6.5. Meß- und Beobachtungsmethoden

6.5.1. Beobachtung der Strömung

Informationen über das Geschehen in Strömungen können durch Sichtbarmachung derselben auf direktem Wege gewonnen werden, z.B. durch Farbzugabe in die Strömung. Leider verursacht das Einbringen der Farbe in die Grenzschichtströmung immer eine erhebliche Störung, so daß man nie sicher ist, wie weit die Situation beeinflußt wird. Ich habe Versuche durchgeführt, in denen die Strömung durch Färbung sichtbar gemacht wurde. Die Ergebnisse wurden auf den der Dissertation beigefügten Super-8-Filmen festgehalten und werden in Kap. 7.2.2. ausgewertet.

Messung des hydrodynamischen Druckes

Die Verteilung des hydrodynamischen Druckes gibt nur indirekte, allerdings hoch korrelierte Information über das Verhalten der Grenzschicht (Kap. 2.4.). Diese Methode liefert darüber hinaus Hinweise auf die Dynamik der Strömung aufgrund der Interaktionen zwischen dem beweglichen Körper und des strömenden Wassers, wie sie in Kap. 5 angesprochen werden.

In den Modellen sind deswegen Schläuche (Ø = 0,5 mm) eingegossen, die sich senkrecht zur Oberfläche öffnen. Die Schläuche verlaufen durch das Innere des Halterungsrohres zu der außerhalb des Wasserkanals befindlichen Druckmeßdose (PDCR 22/1 psi), welche die Druckwerte in elektrische Signale verwandelt. Diese Meßanordnung registriert den hydrodynamischen Druck p in der Außenströmung über der jeweiligen Meßstelle. Die Druckwerte hängen von der örtlichen Strömungsgeschwindigkeit ab, die sich von der Strömungsgeschwindigkeit v_∞ vor dem Körper unterscheidet. Weit vor dem Körper, wo diese Geschwindigkeit v_∞ herrscht, herrscht der sogenannte Umgebungsdruck.

Die Differenz zwischen Umgebungsdruck p_∞ und hydrodynamischen Druck gibt Aufschluß, wie weit die Körperform die Strömung beeinflußt. Diese Subtraktion ist in das Meßverfahren integriert, indem von vorn herein die Druckdifferenz

$$\Delta p = p_\infty - p$$

bestimmt wird. Das elektrische Signal der Druckmeßdose wird entsprechend der Eichung in "mm Wassersäule" angegeben (Abb. 22).

Hertrich und Wagner (1967) zeigten, daß dieses Meßverfahren auch für instationäre Vorgänge verwendbar ist, unter der Voraussetzung, daß das Meßgerät möglichst trägheitslos arbeitet. Das trifft auf die benutzte Druckmeßdose zu.

Die Verteilung des hydrodynamischen Druckes um einen Körper ist um so besser zu erfassen, je mehr Meßstellen Mp angebracht sind. In diesen Experimenten mußte die Zahl der Meßstellen begrenzt bleiben, da nur 4 Schläuche in dem Halterungsrohr Platz fanden. Die damit verbundene Einschränkung auf 3 ventrale, 3 laterale, sowie je eine rostrale und caudale Meßstelle (Abb. 19) erschien vertretbar, da diese Arbeit zunächst zu qualitativen Aussagen führen sollte.

Durch ein "Scanny Valve" ist die Druckmeßdose zu einem Vielfachmanometer erweitert worden und die Meßstellen konnten hintereinander

auf die Druckmeßdose geschaltet werden, während der bewegte Körper angeströmt wird. Die elektrische Signale der Druckmeßdose wurden auf einem Rekorder (Philips Minilog 4) analog aufgezeichnet.

Gleichzeitig werden die translatorischen Bewegungen des Moduls durch den Einbau einer Lichtschranke registriert. Die Impulse der Lichtschranke sind mit dem linken Umkehrpunkt der Flukenbasis bei Lamna und Scomber und mit dem dorsalen beim Delphin gekoppelt. So ist es möglich, die in zeitlicher Folge hintereinander aufgenommenen Drucksignale auf bestimmte Phasen der Bewegung zu beziehen.

Zur Bestimmung des Gesamtwiderstandes der Modelle ist ein Dehnungsmeßstreifen (DMS) auf dem quer zur Strömung ausgerichteten Halterungsrohr angebracht. Der DMS registriert die Verbiegung des Halterungsrohres, wenn der Körper angeströmt wird. Allerdings ist dieser Versuchsaufbau nicht rückwirkungsfrei, da das Rohr ebenfalls einen Widerstand erzeugt. Dennoch ist dieser experimentelle Weg verfolgt worden. Mittels eines Brückenspeisespannungsgerätes (BHL 5107) wurde der DMS zu einer vollen Wheatstoneschen Brücke ergänzt. Die Signale der geeichten Brücke wurden mit den anderen Signalen aufgezeichnet und sollten Aufschluß über den Widerstand in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Frequenz geben.

6.6. Abschätzung der Bewegungsparameter für die Modelle

Die Bewegungen der Modelle sollten der scombridifomen Bewegungsweise entsprechen, insbesondere den Parametern Körperwellengeschwindigkeit und Körperwellenlänge. Die kinematischen Analysen eigener Filme (Kap. 4.3.) lieferten geeignete Werte als Grundlage für die Experimente. Aus folgenden Gründen fanden die Werte des Thunfisches Sarda Verwendung:

a) die Reynolds-Zahlen für den lebenden Fisch und das Modell stimmen nahezu überein, da die Körperlängen von beiden wenig voneinander ab-

weichen. Dadurch wird die Anströmgeschwindigkeit in einem Bereich gehalten, der über die reduzierte Frequenz zu Schlagfrequenzen führen, die das Modell nicht zerstören

b) zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns lagen nur die Daten für Sarda vor.

Für die Übertragung der Körperwellenbewegung auf die Modelle gilt:

$$\frac{\lambda_{b\,modell}}{\lambda_{b\,Fisch}} = \frac{L_{modell}}{L_{Fisch}}$$

und es folgt

$$\lambda_{b\,modell} = 0{,}275\ m$$

Die Wellenlänge λ_b ist auf die Körperlänge $L_{modell} = 0{,}3$ bezogen. Am Modell ist der Bereich der Wellenerzeugung durch den Abstand der Schnüre festgelegt (abst = 0,05 m), so daß die Wellenlänge $\lambda_{b\,modell}$ für diesen Bereich berechnet werden muß, d.h. es muß der Phasenunterschied bestimmt werden, welcher zwischen dem caudalen und rostralen Krafteinlenkungspunkt (Abb. 18) existiert, um eine scombridiforme Bewegung zu erzeugen. Die Phasenverschiebung beträgt

$$\frac{abst.\ 360°}{\lambda_{b\,modell}} = \frac{0{,}05 \cdot 360°}{0{,}275} = 65°$$

und vermittelt im Experiment den Eindruck einer "echten" scombridiformen Körperbewegung.

Für die Übertragung der Modellergebnisse auf den realen Fisch ist neben der Wellenerzeugung die Einhaltung von Kennzahlen unvermeidlich (Kap. 5.2.). Es sind dieses die Reynolds-Zahl und die reduzierte Frequenz Σ. Legt man die beobachteten Werte von Sarda zugrunde (S. 34):

$$L = 0{,}45\ m, \quad v_0 = 3 \times L\,s^{-1}, \quad \omega = 2{,}2\ Hz$$

folgt

$$\Sigma = \frac{\omega L}{v_0} = 0{,}7$$

Für die Experimente ist $\Sigma = 0,7$ als obere Grenze festgelegt worden, da zum einen die Berechnungen für die Delphine gleichfalls diesen Größenordnungsbereich ergaben, zum anderen hatte es sich herausgestellt, daß bei höheren reduzierten Frequenzen die Modelle überbeansprucht und zerstört würden. Da für die Frequenz der scombridiformen Bewegung im Modell die folgende Gleichung gelten muß:

$$\Sigma = \frac{\omega_{Fisch} \times L_{Fisch}}{\upsilon_{Fisch}} = \frac{\omega_{modell} \times L_{modell}}{\upsilon_{modell}}$$

würde eine Vergrößerung des numerischen Wertes von Σ bei gleicher Reynolds-Zahl (gleiche Re-Zahl bedeutet $\upsilon_{Fisch} \times L_{Fisch} = \upsilon_{modell} \times L_{modell}$, wenn der Modellversuch ebenfalls im Wasser durchgeführt wird) zu einer Erhöhung der Schlagzahl pro Sekunde am Modell führen, welche das Material nicht aushält. Für die Versuche wurden verschiedene reduzierte Frequenzen und Strömungsgeschwindigkeiten kombiniert:

Tab. 3

Σ \ υ	1.5	2.0	2.5	3.0	ms^{-1}
0.2	= 1 Hz	1.3 Hz	1.6 Hz	2.0 Hz	
0.3	1.5 Hz	2.0 Hz	2.5 Hz	3.0 Hz	
0.5	2.5 Hz	3.3 Hz	4.1 Hz	5.0 Hz	
0.7	3.5 Hz	4.6 Hz	5.8 Hz	7.0 Hz	

Viele dieser Kombinationen treten in der Natur nicht auf. Bei lebenden Tieren stellen sich die bestmöglichen Kombinationen zweifellose von selbst ein, jede Abweichung muß aus naheliegenden Gründen der Selektion verfallen. Für die erste Annäherung an das Umschlagphänomen bei Körpern mit Formveränderung ist aber eine breiter angelegte Versuchsserie vonnöten.

Jedes Modell wird unter verschiedenen Bewegungsbedingungen untersucht:

I, drei stationäre Phasen

Ia, Modell mit gestrecktem Körper

Ib, Modell mit maximal nach links (dorsal) gebogenem Körper

Ic, Modell mit maximal nach rechts (ventral) gebogenem Körper

Die gebogenen Körperstellungen wurden erzeugt, indem auf der jeweiligen Seite die an der Flukenbasis angreifenden Schnur angezogen wurde.

II, Zwei Serien instationärer Zustände, jeweils entsprechend der Tabelle 3

IIa, Modell mit einfacher Körperschwingung

IIb, Modell mit Körperwelle (scombridiforme) Bewegung

7. Befunde

7.1 Filmauswertung

7.1.1. Bewegungen der Modelle

Die Bewegungen entsprachen dem optischen Eindruck nach den gefilmten Bewegungen realer Tiere (Kap. 4.3.) Die kinematische Analyse der Bewegungen eines Modells, durchgeführt nach dem gleichen Verfahren wie bei den Tieraufnahmen gab direkten Aufschluß, wie genau die von der Natur vorgegebene Bewegung kopiert worden ist. In Abb. 23 sind als Ergebnis der Analyse die Weg-Zeit-Kurven für drei Körperpunkte auf einem Haimodell wiedergegeben:

Punkt A: Körperpunkt ($x = 0.71 \times L$)

Punkt B: Basis der Fluke ($x = 0,89 \times L$)

Punkt C: Flukenspitze

Diese Kurve zeigt die gleichen Charakteristika wie die Weg-Zeit-Kurve von Sarda chiliensis (Abb. 17). Bei der technisch vorgegebenen Bewegung wird die Fluke nicht direkt angesteuert, sondern folgt passiv den Bewegungen des Schwanzstiels. Fierstine u. Walters (1968) geben den maximalen Winkel zwischen der Fluke und dem Schwanzstiel bei scombridiformer Bewegung mit 29° an. Bei den Haimodellen wurden Werte von 28°-30° gemessen, wenn der Schwanzstiel von links kommend, über die Verlängerung der Körperlängsachse schlug.

Für die Gleichartigkeit der Bewegungen der Modelle und der von realen Tieren spricht auch der Vergleich der Körperwellengeschwindigkeiten (Kap. 4.2.1.). Die Körperwellengeschwindigkeit betrug für das Modell $v_{b\,modell}$ = 0,74 ms^{-1}. Dieser Wert kommt dem angestrebten Wert v_b = 0.69 ms^{-1} sehr nahe. Das Bewegungsmodul schafft demnach die kinematischen Voraussetzungen für die Erzeugung der scombridiformen Bewegung.

.1.2. Sichtbarmachung der Strömung

Eine erste Beurteilung der Strömungsverhältnisse, insbesondere des Strömungszustandes um einen vorgegebenen Körper ist möglich, wenn es nur gelingt, die Strömung sichtbar zu machen. In diesem Zusammenhang sei an Rauchkanalversuche mit neuen Autokarosserien erinnert. Dieser Untersuchungsansatz ist auch in diesen Modellversuchen durchgeführt worden. An starren Körpern erfaßt eine Photographie den Zustand der Strömung voll. Bei instationären Strömungen ist es jedoch nötig, mehrere Photographien oder Filme herzustellen. Letztere sind besser geeignet, kurzfristige Veränderungen festzuhalten, zumal unser Auge kaum in der Lage ist, Details bei Frequenzen $\omega > 2$ Hz noch genau zu erkennen.

Während man im Windkanal die Strömung z.B. durch Rauch sichtbar machen kann, gibt es kaum geeignete Methoden, um eine Wasserströmung sichtbar zu machen. Versuche mit einem "Wasserstoffbläschengenerator",

der Ketten feiner Bläschen in die Strömung abgibt, schlugen genauso fehl, wie die Zugabe von kleinen Schwebepartikeln. Am besten schienen noch Kondensmilch oder Sahne geeignet, die über eine Sonde in 0,2 m Abstand vor dem Modell in die Strömung injiziert wurden. Allerdings verteilten sich diese Substanzen nach kurzer Laufstrecke durch Verwirbelung hinter der Sonde und eine Beobachtung zumindest der Grenzschichtströmung war nicht mehr möglich. Hingegen konnte aber bei diesen Versuchen die Interaktion der Flukenbewegung und der Strömung vom Körperende beobachtet werden (Abb. 24).

Die Umströmung an der Fluke ist u.a. wegen der Schuberzeugung von Interesse. Liebe (1963) hat die Flukenbewegung durch eine schlagende Klappe simuliert und mit dieser Versuche im Rauchkanal durchgeführt. Aufgrund von Berechnungen zeigte er, daß der Schub um so kräftiger ist, je mehr Impuls in einem Wirbelpaket enthalten ist, welches von der Hinterkante der Fluke abgeschleudert wird. Die Wirbelballung, wie Liebe es nennt, ist das Resultat aus kinematischen und geometrischen Faktoren. Die Beschränkung auf eine schlagende Klappe entspricht nicht ganz der Realität, da die Strömung, bevor sie auf die Fluke trifft, von dem oszillierenden Schwanzstiel beeinflußt ist. Meine Versuche zeigen, daß auch bei periodischen Formveränderungen des Schwanzstiels die Strömung von der Fluke zu Wirbelpaketen aufgerollt wird, so wie es Liebe für die schlagende Klappe beschreibt. Der Befund ist deshalb wertvoll, weil das Modell eine dem realen, lebenden Tier entsprechende Antriebsbewegung ausführt.

Erst nachdem die Zugabe und das Kontrastmittel geändert worden ist, wurde die Grenzschicht sichtbar. In die Modelle waren, wie in Kap. 6.5.2. beschrieben, Druckschläuche eingegossen worden, die sich an bestimmten Punkten der Modelloberfläche nach außen hin öffneten. Durch diese Schläuche wurde das Kontrastmittel injiziert, wobei sich Lebensmittelfarbe als das beste Färbemittel erwiesen hat.

Tritt die Lebensmittelfarbe am offenen Ende des Schlauches aus, wird sie von der Grenzschichtströmung erfaßt und fließt als Farbfaden entlang

des Körpers schwanzwärts. Da der Farbfaden Element der Grenzschicht ist, kann über sein Verhalten auf das der Grenzschicht geschlossen werden. Solange die Farbe als Faden zu erkennen ist, kann man auf eine ungestörte Grenzschicht schließen, ein Ausweiten zu einem breiten Band deutet auf Turbulenzbildung hin.

Wird die Lebensmittelfarbe bei starrem, gestrecktem Modell an der Spitze des Rostrums injiziert, strömt sie an der Seite des Modells schwanzwärts. Sie bleibt bis hinter die Halterungsstange in Form eines Fadens sichtbar (Abb. 25a). In der gleichen Abbildung ist auch die Veränderung des Farbfadens bei scombridiformer Bewegung (ω = 3,4 Hz, U_0 = 2 ms^{-1}) skizziert. Die einzelnen Phasen sind den Bildern eines Super-8-Filmes nachgezeichnet. Die Aufnahmegeschwindigkeit betrug 24 Bilder s^{-1} und es sind zwei volle Bewegungszyklen in 14 aufeinanderfolgenden Bildern wiedergegeben. Man erkennt die Periodizität der Veränderungen des Farbstreifens, die von den Bewegungen des Schwanzstiels abhängen. Schlägt dieser zur rechten Seite, so ist die Farbe zu einem Faden konzentriert und strömt nahezu in der Frontalebene schwanzwärts. Nach dem Erreichen des rechten Umkehrpunktes verändert sich der Strömungsverlauf. Der Farbstreifen wandert von der Frontalebene sukzessive zum Rücken. Gleichzeitig ist eine Auffächerung zu einer breiten Zone zu beobachten. Zusätzlich sieht man Farbstreifen, die losgelöst vom "Hauptfaden" plötzlich zu entstehen scheinen. Vermutlich führt das Rostrum leichte Gegenbewegungen durch, welche diese Erscheinung bedingen. Der Hauptfaden jedoch ist deutlich auszumachen und wechselt hinter der Rückenflosse auf die andere Körperseite, wenn sich der Schwanzstiel im Bereich des linken Umkehrpunktes befindet. Beim erneuten Rückführen des Schwanzstiels nach rechts wandert der Farbstreifen auch wieder in die Frontalebene und konzentriert sich gleichzeitig. Obschon es zur Zeit schwerfällt, diese Beobachtungen in Bezug auf die Kräfte der instationären Strömung zu interpretieren, kann man sagen, daß die Bewegungen des Schwanzstiels auch zu Reaktionen am Vorderkörper führen, die also entgegen der Strömung fort-

schreiten. Die örtlichen Kräfte hängen den Versuchen zufolge nicht von den örtlichen Gegebenheiten ab, wie z.B. in der Bernoulli-Gleichung vorausgesetzt wird. Diese Art der Interaktion nennt Lighthill (1970) "resistive", während es für die Interaktion von Strömung und scombridiformer Bewegung den Begriff "reactive" benutzt.

Die solchermaßen mit "reaktiven Kräften versehene Strömung" zeigt ein weiteres, bisher noch nicht beschriebenes Verhalten der Strömung. Injiziert man Lebensmittelfarbe durch eine seitlich am Modell liegende Öffnung vor dem größten Körperdurchmesser (hier: rechte Seite, 0,36 x L hinter dem Rostrum) so verbreitert sich der Farbfaden am starren Körper bei 0.4 x L zu einem breiten Band (Abb. 26 a). In der gleichen Abbildung ist auch das Verhalten des Farbfadens bei scombridiformer Bewegung (ω = 3,4 Hz, v_0 = 2 ms^{-1}) skizziert. Es sind 14 aufeinanderfolgende Bilder eines Super-8-Filmes nachgezeichnet, was zwei vollen Zyklen entspricht.

Auch in Abb. 26 b fällt die Periodizität des Geschehens auf. Der Farbfaden fächert sich bei 0.43 x L zu dem breiten Band auf, wenn sich der Schwanzstiel auf der gegenüberliegenden Seite im Bereich des (linken) Umkehrpunktes befindet. Während des Rückschlages zum (rechten) Umkehrpunkt verringert sich seine Breite. Ist der Schwanzstiel nach rechts gebogen hat sich der Umschlag bis 0,54 x L rückwärts verlagert, d.h. um rund 3 % der Länge und ist stark konzentriert.

Die Rückverlagerung des Umschlagsbereiches ist ebenfalls eine Reaktion auf die periodischen Formveränderungen. Den vorherigen Versuchen entsprechend bleibt auch hier die Grenzschicht länger laminar, wenn sich der Schwanzstiel in die Richtung bewegt, an der die Farbe austritt. Diese zeitweilige Rückverlagerung des Umschlags bei instationärer Strömung könnte anzeigen, daß die Grenzschicht insgesamt energieärmer ist. Ob sich das tatsächlich so verhält und ob somit hier eine Lösung des Grayschen Paradoxons zu finden sein kann, bleibt noch zu klären. Die Versuche zeigen aber, in welcher Richtung möglicherweise die Problemlösung zu suchen ist.

7.2. Gesamtwiderstand

Bisher ist der Gesamtwiderstand der Fische mit Locomotionsbewegungen mit dem Widerstand bei gestreckter Körperhaltung gleichgesetzt worden. Die Untersuchungen am starren Haimodell führten zu Widerstandswerten, die sich von denen einer ebenen Platte nur um den Faktor 1,6 unterschieden (Ungerechts, 1975, 1977). Die so ermittelten Widerstände erwiesen sich dennoch als zu hoch, im Vergleich zur maximalen Leistungsfähigkeit der Muskulatur (Kap. 1.2.). Der Widerstand bei aktiven Schwimmbewegungen konnte bisher nicht ermittelt werden. Dieser Versuchsaufbau stellte in Aussicht, auch dieser Frage nachzugehen.

Zunächst sollte der Einfluß des Halterungsrohres auf den Widerstand des Systems "Modell-Rohr" ermittelt werden. In einem gesonderten Versuch im Windkanal wurden die Widerstandsbeiwerte c_w für den starren Körper mit und ohne Halterungsrohr bei Reynolds-Zahlen $7{,}7 \times 10^5 < Re < 9{,}2 \times 10^5$ bestimmt. Der Widerstandsbeiwert für das Modell mit Halterungsrohr lautet: $c_w^s = 4{,}0 \times 10^{-2}$, der Beiwert ohne Rohr $c_w^0 = 1{,}6 \times 10^{-2}$. Der Unterschi zwischen den Beiwerten, der auf die Existenz des Rohres zurückzuführen ist beträgt 40 %.

Die Widerstandsmessungen an den beweglichen Modellen im Wasserkanal zeigen, daß der Einfluß des Rohrwiderstandes zu mächtig ist, als daß eine mögliche Widerstandsverminderung aufgrund der Körperbewegungen ins Gewicht fällt. In Abb. 27 sind die Signale des DMS für verschiedene Geschw digkeiten bei scombridiformer Körperbewegung wiedergegeben. Die Signale oszillieren in Abhängigkeit von der Frequenz. Das mittlere Niveau der Signale steigt mit zunehmender Geschwindigkeit, unterscheidet sich aber nicht von dem Widerstand bei starrem Körper.

Bei einfacher Schwingung oszillieren die Signale ebenfalls um das gleich mittlere Niveau. Die Amplituden der Signale bei scombridiformer Bewegung sind im Vergleich kleiner. Diese Verkleinerung ist auf die Wirkung des verkürzten Hebelarmes der rostralen Krafteinlenkung zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen, daß diese Meßanordnung nicht geeignet ist, den Gesamtwiderstand eines beweglichen Körpers zu ermitteln. Ebenso wenig ist dieser Aufbau geeignet, die mit den Antriebsbewegungen auftretenden Schubkräfte zu registrieren, da der Widerstand des Rohres auch diese bei weitem übertrifft.

7.3. Druckmessungen

Die Befunde aus den Farbversuchen deuten auf eine Beeinflussung der Grenzschicht durch die periodischen Körperbewegungen hin. Eine Deutung der dies bewirkenden Ursachen lassen Farbversuche nicht zu. Sie haben aber gezeigt, daß die Halterungsstange von geringerem Einfluß auf die Umströmung der Modelle ist, d.h. der Einfluß ist auf einen kleinen Radius um die Stange begrenzt. Der Ursachenerforschung über den Weg der Messung der Druckverteilung steht somit nichts entgegen.

7.3.1. Eigene Ergebnisse

In den Versuchsreihen mit bewegtem Körper ist der Druck $(p - p_\infty)$ an den Meßpunkten Mp zu vier verschiedenen Zeitpunkten der Periode t_i ausgewertet worden. Die Dauer der Periode wurde durch die Signale der lichtschranke festgehalten, die ebenfalls auf dem Oszillogramm erschienen. Zur Auswertung wurden innerhalb der Periode T_o folgende vier Zeitpunkte t_i $(i = 1,2,3,4)$ ausgewählt:

$$t_1 = 0 \quad \text{sec}$$
$$t_2 = 1/4\ T_o + t_1 \quad \text{sec}$$
$$t_3 = 1/2\ T_o + t_1 \quad \text{sec}$$
$$t_4 = 3/4\ T_o + t_1 \quad \text{sec}$$

Zum Zeitpunkt t_1 ist die Flukenbasis im linken (dorsalen) Umkehrpunkt. Die übrigen 3 Zeitpunkte lassen sich nicht so genau mit einer Körperpo-

sition verknüpfen, da das Modul asymmetrische Bewegungen erzeugt. Zu diesen Zeitpunkten können also die Positionen des Schwanzstiels nur auf Bereiche bezogen werden. Zum Zeitpunkt t_3 ist die Flukenbasis im Bereich des rechten (ventralen) Umkehrpunktes und bei t_2, t_4 ungefähr in Verlängerung der Körperlängsachse.

Für jeden Zeitpunkt wurde das Drucksignal von 10 aufeinanderfolgenden Bewegungszyklen ermittelt und dieser arithmetischer Mittelwert $(p - p_\infty)$ in Form des dazugehörigen Druckbeiwertes c_p registriert (Kap. 2.2.2.). Die Gleichung lautet:

$$c_p = \frac{p_{Mp} - p_\infty}{1/2\, \rho\, v_0^2}$$

Der im Zähler stehende Ausdruck entspricht dem Meßsignal der Druckmeßdose, der im Nenner stehende Term wurde jeweils berechnet. Die Ergebnisse werden mit den Größen c_p, M_p und der Laufvariable t_i in Form einer Funktion $c_p = f\,(Mp, t_i)$ aufgetragen. Diese Art der Darstellung läßt zwei Betrachtungsweisen zu:

a) Druckschwankungen über ein und derselben Meßstelle während eines ganzen Zyklus

b) Verteilung des Druckes entlang des Körpers zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb eines Zyklus

7.3.1.1. Haifischmodell

An dem Haifischmodell befinden sich 6 Meßstellen (Abb. 19), nämlich am Rostrum, rechts auf der Seitenlinie bei 0,36, 0,47, 0,64 und 0,86 der Körperlänge sowie in dem Winkel zwischen den Lappen der Fluke. Bei weiteren verwendeten Modellen sind die Meßstellen in vergleichsweisen Positionen angebracht worden. Die dabei erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Druckverteilung entsprechen den in folgenden Abbildungen dargestellten. In Abb. 28a ist die Verteilung des Druckbeiwertes auf die Meßstellen bei

starrem, gestrecktem Körper wiedergegeben. Zum Vergleich ist in Abb. 28b der absolute Druck für einen mit konstanter Geschwindigkeit gleitender Lamna ($L = 1{,}80$ m, $v_0 = 9\ ms^{-1}$, $Re = 10^7$) unter Benutzung der Modellergebnisse skizziert.

Die Verbindung zwischen benachbarten Druckmessungen ist als gerade Linie gezeichnet, da hier keine Meßstellen bzw. Ergebnisse vorliegen. Die Verbindungslinien dürften jedoch dem wirklichen Kurvenverlauf recht nahe kommen. Eine qualitative Prüfung kann man anhand der Bernoullischen Druckgleichung anstellen. Das Druckminimum liegt im Bereich der Meßstelle $^x/L = 0{,}36$. Das war zu erwarten, da hier der Körper seinen größten Durchmesser aufweist, d.h. die Geschwindigkeit der Außenströmung am höchsten ist. Hinter dem größten Körperdurchmesser zeigen die Kurven den für die Körperform normalen Verlauf. Mit der stetigen Verringerung des Körperdurchmessers steigt der Druck zum letzten Meßpunkt ständig an.

Die gleiche Beobachtung macht man, wenn sich die Meßpunkte nicht lateral, sondern ventral befinden. In Abb. 29 sind die an ventralen Meßstellen ermittelten Druckbeiwerte des Haifischmodells wiedergegeben, die sich auf gleicher Höhe wie die lateralen befinden. Das Druckminimum befindet sich ebenfalls bei $^x/L = 0{,}36$, ist aber niedriger als das laterale Minimum. Das hängt mit der größeren Beschleunigung der Strömung aufgrund der stärkeren ventralen Körperwölbung zusammen.

Verbiegt man den Körper in eine Phase der Wellenbewegung oder einfach indem der Schwanzstiel in einer rechten, respektive linken extremen Auslenkposition fixiert wird, so entsprechen sich die Beobachtungen für die ventralen und lateralen Meßstellen ebenso. In Abb. 30a, b ist die Verteilung des Druckbeiwertes bei gebogenem Körper für ventrale und laterale Meßstellen wiedergegeben. Die Druckkurven unterscheiden sich kaum von denen bei gestrecktem Körper (Abb. 28 und 29). Das Druckminimum befindet sich weiterhin im Bereich $^x/L = 0{,}36$. Ist der Schwanzstiel nach links gebogen, so ist das Druckniveau im Vergleich zum nach rechts gebogenen Schwanzstiel niedriger.

Auch diese Beobachtung ist vor dem Hintergrund der Bernoullischen Gleichung zu erklären, da es sich auch bei diesem Versuch um eine stationäre Strömung handelt, denn der Schwanzstiel verbleibt in der Position des linken oder rechten Umlenkpunktes. Ist der Körper nach links gebogen und die Meßstellen sind auf der konvexen Seite, also rechts, so ist hier eine relativ größere Geschwindigkeit der Strömung wegen des etwas längeren Weges zu erwarten. Damit ist ein größerer Druckabfall verbunden. Für das Modell mit den ventralen Meßpunkten gilt das Gleiche, denn die Meßstellen konnten nicht genau median angebracht werden, da sich hier das Federblech befand.

Die Lage des Druckminimums und die Steigung der Druckgradienten werden durch die seitliche Auslenkung des Schwanzstiels nicht verändert. Betrachtungen stationärer Strömung bei gebogenem Körper führen zu keiner neuen Annäherung an die Erklärung des Grayschen Paradoxons und zeigen die Wichtigkeit der Untersuchung instationärer Strömungen. Für die weiteren Experimente am beweglichen Haifischmodell ist der Druck über den seitlich liegenden Meßstellen gemessen worden. Diese liegen in der Schlagebene des Schwanzes und sind von größerem Interesse, da durch die Körperbewegungen eine Strömung auf diese Meßstellen nun zusätzlich auftritt.

In den Abbildungen 31 und 32 sind die Druckbeiwerte, also nicht mehr der absolute Druck zu vier Zeitpunkten der Periode in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge aufgetragen. Bei scombridiformer Bewegungsweise (Abb. 31) sind deutliche Änderungen des Druckminimums innerhalb der Periode zu beobachten, jedoch keine Verschiebung der Lage. Der Druck ist in 80 % der Fälle zum Zeitpunkt t_2 am geringsten, d.h. zu dem Zeitpunkt, wenn der Schwanzstiel von links kommend die Körperlängsachse passiert.

Betrachtet man die Schwankungen des Druckes über einer Meßstelle während einer Periode, fallen die großen Schwankungen über den hinte-

ren Meßstellen auf. Mit der Verkleinerung der reduzierten Frequenz verringern sich diese Variationen sichtbar.

Besondere Aufmerksamkeit verdient das erneute Absinken des Druckes zum Schwanzende hin, nachdem er schon angestiegen war. Dieser Phänomen ist bei stationären Strömungen nicht beobachtet worden. Dieses Zwischenmaximum tritt zu verschiedenen Zeitpunkten eines Zyklus auf. Der Ort, über dem sich dieses Maximum befindet, variiert gelegentlich; bevorzugter Punkt ist $^{x}/L = 0{,}86$. Kontrolliert man, zu welchem Zeitpunkt ein Zwischenmaximum an dieser Stelle auftritt, so stellt man fest, daß das immer geschieht, wenn die Meßstellen auf der konvexen Seite liegen, d.h. wenn die Strömung auf die Meßstellen gerichtet ist.

In Abb. 32 ist die Verteilung des Druckes bei einfacher Körperschwingung wiedergegeben. Das Druckminimum ist auch hier auf $^{x}/L = 0{,}36$ konzentriert. Die Werte hingegen sind durchweg mehr ins Negative verschoben als bei scombridiformer Bewegung. Das deutet darauf hin, daß lokale Effekte nicht von lokalen Kräften hervorgerufen werden, denn der Körper ist in diesem Bereich nahezu starr und müßte demzufolge gleiche Werte wie bei stationärer Strömung aufweisen. Die größten Druckschwankungen während eines Zyklus treten über der Meßstelle $^{x}/L = 0{,}86$ bei hohen reduzierten Frequenzen auf. Diese Schwankungen verkleinern sich sowohl mit abnehmender Schlagfrequenz als auch mit Vergrößerung der Reynolds-Zahl. Über dieser Meßstelle ist in der gesamten Versuchsserie ein Zwischenmaximum zu erkennen. Es tritt mit einer gewissen Regelhaftigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb des Zyklus auf. Die Verteilung des Druckes zum Zeitpunkt t_3 weist stets ein Zwischenmaximum auf, wenn sich also die Basis der Fluke im Bereich des rechten Umkehrpunktes befindet. Eine hiermit vergleichbare eindeutige Zuordnung zwischen momentaner Geometrie und Zwischenmaximum der Druckverteilung ist bei den Kurven der scombridiformen Bewegung nicht zu beobachten.

7.3.2.1. Makrelenmodell

Der schmale Körper des Makrelenmodells brachte einige Einschränkungen hinsichtlich der Meßstellen mit sich. Es war nicht möglich, den letzten Meßpunkt an das Ende der Fluke zu legen, da der Druckmeßschlauch keinen Platz im Übergangsbereich Schwanzstiel.Fluke fand, ohne das Modell zu zerstören. Außerdem konnten im Makrelenmodell aus versuchstechnischen Gründen keine lateral liegenden Meßstellen installiert werden.

In Abb. 33 ist die Druckverteilung über dem Rostrum und den ventral liegenden Meßstellen $^{x}/L = 0{,}41$, $^{x}/L = 0{,}58$, $^{x}/L = 0{,}86$ bei starrem, gestrecktem Körper wiedergegeben. Diese einzige Kurve gilt für alle Strömungsgeschwindigkeiten und besitzt ihr Minimum über der Meßstelle $^{x}/L = 0{,}41$.

Ihr stehen die Druckverteilungskurven bei bewegtem Körper gegenüber (Abb. 34,35). Bei scombridiformer Bewegung (Abb. 34) fällt auf, daß der Druck bei kleinen Reynolds-Zahlen besonders erheblichen Schwankungen während eines Bewegungszyklus unterliegt. Das trifft auf den Schwanzstiel zu, insbesondere auf die Meßstelle $^{x}/L = 0{,}58$. In allen Fällen ist hier zum Zeitpunkt t_2 das Druckminimum, statt an der Stelle $^{x}/L = 0{,}41$ wie beim starren Modell. Das ist insofern interessant, als daß der Körper zum Zeitpunkt t_2 in etwa die gestreckte Position wie beim starrem Körper einnimmt. Hierfür ist die Gesamtbewegung verantwortlich. Über der Meßstelle $^{x}/L = 0{,}58$ wurde in 50 % der Messungen auch ein Druckminimum zum Zeitpunkt t_1 beobachtet. Beide Beobachtungen bedeuten, daß das Druckminimum durch die Körperbewegung zeitweise rückwärts verlegt wird. Nach den Ausführungen in Kap. 5 wird dadurch das Umschlagverhalten der Grenzschichten beeinflußt. Der Druck im letzten Meßpunkt $^{x}/L = 0{,}86$ liegt nahezu während der gesamten Periode unter dem bei stationärer Strömung.

Eine Verlegung des Druckminimum nach hinten tritt bei einfacher

Schwingung (Abb. 35) nicht mit dieser Regelhaftigkeit auf. Bei hohen reduzierten Frequenzen sind die Schwankungen im Meßpunkt $^{x}/L = 0,86$ beträchtlich; sie nehmen also bei konstanter Reynolds-Zahl mit Verringerung der Frequenz ab. Dies spricht für einen gewichtigeren Einfluß der Frequenz (oder der reduzierten Frequenz) als der Geschwindigkeit (oder der Reynolds-Zahl) auf die Strömung.

7.3.1.3. Delphinmodell

An dem Delphinmodell (Abb. 19) befanden sich die Meßstellen auf der dorsalen Körperseite, also in der Bewegungsebene des Schwanzstiels an folgenden Punkten $^{x}/L = 0,1$, $^{x}/L = 0,33$, $^{x}/L = 0,5$, $^{x}/L = 0,68$ sowie am Rostrum und in dem Winkel zwischen den Lappen der Fluke.

In Abb. 36 ist die Verteilung des Druckbeiwertes entlang des Delphinrückens für 3 Phasen der Schlagbewegung wiedergegeben. Folgende Stellungen wurden herausgegriffen:

a, nach ventral gebogen

b, nach dorsal gebogen

Die Kurve für den gestreckten Körper liegt zwischen den beiden, ist aber wegen der Übersichtlichkeit der Zeichnung herausgelassen worden. Da es sich jeweils um eine stationäre Strömung handelt, können die Kurven verglichen werden. Der Vergleich zeigt, daß die Kurven im Schwanzstielbereich divergieren. Der niedrigste Druckwert geht mit der Stellung "ventral gebogen" einher. Für die Meßstellen ist dies die konvexe Seite und ähnlich wie beim Haifischmodell ist der Druck wegen der höheren Strömungsgeschwindigkeit an der Konvexität niedriger. Beide Kurven weisen ihr Minimum an der gleichen Stelle $^{x}/L = 0,5$ auf und steigen nach $^{x}/L = 0,68$ an. Die anschließend, nahezu konstante Entwicklung des Druckes bis $^{x}/L = 1$ ist auf die Lage der Meßpunkte zurückzuführen. Anders als bei den Fischmodellen befindet sich beim Delphin die Rückenflosse in Schlagebene.

Deshalb mußten die Meßpunkte $^{x}/L = 0,33$, $^{x}/L = 0,5$ etwas zu dieser Ebene versetzt, angebracht werden. Das hat zur Konsequenz, daß hier Druckwerte verglichen werden, die nicht auf derselben Höhe gemessen worden sind, wie z.B. bei dem Haifisch. Für diese Untersuchung ist das aber von untergeordnetem Interesse, da es hier zunächst einmal um das grundsätzliche Verhalten des Druckes geht.

In der Abb. 37 ist die Verteilung des Druckes bei einfacher Schwingung zu vier Zeitpunkten einer Periode wiedergegeben. Das Druckminimum liegt meist über der Meßstelle $^{x}/L = 0,5$. In einem Fall der Versuchsserie ist das Minimum über der Stelle $^{x}/L = 0,33$ zu finden. Diese Stelle liegt unterhalb der Rückenflosse und es ist fraglich, ob ihr die Bedeutung hinsichtlich des Umschlagverhaltens zugemessen werden darf.

Auffällig sind die steilen Neigungen der Druckkurven von der vorletzten Meßstelle, besonders bei hohen reduzierten Frequenzen, $\Sigma \geq 0,5$. Dadurch kommt es über dieser Meßstelle ($^{x}/L = 0,68$) zu Zwischenmaxima. Sie treten in nahezu allen Fällen der Versuchsserie auf, wenn sich die Basis der Fluke im dorsalen (linken) Umkehrpunkt befindet. Auch zum folgenden Zeitpunkt ist der Meßwert hier oft noch höher als über der letzten Meßstelle. Anders als beim Haifischmodell werden die Zwischenmaxima jedoch in anderen Phasen der Bewegung beobachtet. Das ist auf die unterschiedliche Lage der Meßstellen in Bezug auf die Körperseite zurückzuführen. Beim Haifisch liegen die Meßstellen rechts lateral, beim Delphin dorsal, wegen der Drehung um die Längsachse links lateral. Zwischenmaxima treten in beiden Fällen dann auf, wenn die Meßstellen auf der konvex gebogenen Seite liegen und der Körper nach der Bewegungsumkehr wieder beschleunigt wird.

Bei kleinen reduzierten Frequenzen und einfacher Schwingung nähern sich die Druckkurven derjenigen bei stationärer Strömung. Auch bei den anderen Modellen waren die Druckkurven für niedrigere reduzierte Frequenzen denen der stationären Zustände ähnlich. Mit zunehmender reduzierter Frequenz

wurden die Unterschiede zum starren Körper immer größer.

Die Experimente mit scombridiformer Bewegung konnten nur bei den Strömungsgeschwindigkeiten $U = 2,5\ ms^{-1}$ ($Re = 7,5 \times 10^5$) und $U = 3,0\ ms^{-1}$ ($Re = 9 \times 10^5$) durchgeführt werden. Der Grund ist der Ausfall des zur Druckmeßdose zugehörigen Scanny Valve, welches durch Oxydationsprozesse verstopft war und keine Messung mehr ermöglichte. Hinzu kam, daß die Meßstelle $^x/L = 0,33$ wegen eines porösen Schlauches keinen Druck mehr weiterleitete. Die Ergebnisse, welche hiervon nicht betroffen waren, sind in Abb. 38 dargestellt. Das Druckminimum befindet sich jetzt eindeutig über der Körpermitte und ist nicht so weit im negativen Bereich wie bei einfacher Schwingung. Das entspricht den Erkenntnisse an den beiden anderen Modellen. Eine Verschiebung konnte nicht beobachtet werden.

Zwischenmaxima in der Verteilung des Druckes entlang des Körpers treten bei hohen reduzierten Frequenzen ($\sum \geq 0,5$) auf. In allen Fällen erreicht die Druckkurve zum Zeitpunkt t_1, d.h. zur Zeit der Richtungsänderung den größten Zwischenwert. Bemerkenswert scheint, daß bei scombridiformer Bewegung der Druckabfall zur Fluke weniger steil ist als bei einfacher Schwingung, aber im Verlauf eines Zyklus häufiger auftritt.

7.3.2. Vergleich der an den Modell erzielten Ergebnisse

Auf der Grundlage der übereinstimmenden Bewegungsparameter und des übereinstimmenden Auswertverfahrens kann ein Vergleich zwischen den Druckkurven gezogen werden. Die Normierung der Koordinaten und der vier Zeitpunkte des Bewegungszyklus in den Abb. 31,32,34,35,37 und 38 sollen den Vergleich erleichtern. Auf einen detaillierten Vergleich der einzelnen Druckkurven wird verzichtet. Während der Versuche rissen häufiger die Dacron-Schnüre. Die Erneuerung war immer mit dem Problem der vergleichbaren Anspannung verbunden. Schon geringe Längendifferenzen reichen aus, um die Phasen der Bewegung des Körpers nicht mehr genau mit dem vom

Lichtschrankensignal angezeigten zeitlichen Zuordnung übereinstimmen zu lassen. Ebenso waren die Spannungsänderungen in der Schnur selber, etwa durch Ermüdung des Materials oder durch Festziehen der Knoten nicht zu kontrollieren, die im Laufe einer Versuchsreihe kleinere Änderungen bewirkten.

Dennoch lassen sich gemeinsame Charakteristika für alle Versuche an beweglichen Modellen feststellen. Vor allen liegen die Druckminima bei scombridiformer Bewegung deutlich tiefer im negativen Bereich als bei stationärer Strömung. Sie liegen in der Regel auch niedriger als bei einfacher Schwingung. Der Bereich des niedrigsten Druckes liegt im vorderen Körperabschnitt, bei Hai und Delphin eng mit der größte Dicke korreliert.

Da sich der vordere Körperabschnitt auch bei den Schwanzauslenkungen kaum bewegt, ist es zu vermuten, daß der Rumpf formabhängigen, konstanten Widerständen ausgesetzt ist. Die Druckkurven, insbesondere für das Hai- und Delphinmodell, zeigen für diesen Abschnitt weitgehende Übereinstimmung, zumindestens Parallelität zwischen der stationären Strömung und zu allen Zeiten eines Zyklus bei instationärer Strömung. Da aber die Drücke auf dem Vorderteil der bewegten Modell durchweg niedrigere Werte aufweisen, ist anzunehmen, daß eine gewisse Beeinflussung der Strömung durch die Bewegungen des hinteren Abschnittes stattfindet.

Die Verschiebung der Lage des Druckminimums ist nur bei den Experimenten mit den Makrelenmodellen beobachtet worden und tritt nur zeitweise während einer Periode auf. Bei scombridiformer Bewegung ist die Verteilung des Druckes zum Zeitpunkt t_2 (Basis der Fluke kreuzt die Mittelachse, von links kommend) anders als bei starrem Körper. In der gesamten Versuchsserie wird zu diesem Zeitpunkt das Druckminimum nach rückwärts verlagert. Bei einfacher Schwingung ist keine solche strikte zeitliche Zuordnung der Verschiebung während des Zyklus zu beobachten.

Diese auf das Makrelenmodell beschränkte Beobachtung der Verschiebung der Lage des Druckminimum kann seine Ursache in der Verschiedenartigkeit der Körperdurchmesser haben. Der Makrelenkörper ist im Quer-

schnitt oval, während der Rumpf beim Hai und Delphin nahezu drehrund ist. Der größere Einfluß jedoch mag dem Umstand zuzuschreiben sein, daß die Makrele ihren Querschnitt über einen längeren Körperabschnitt beibehält, anstatt nach einem Maximum stetig kleiner zu werden. Das wird durch die Druckmessungen am Delphinmodell gestützt, dessen Durchmesser gering ist, aber sich nach dem Maximum verjüngt und zu keiner Verschiebung der Lage des Druckminimums führt.

Die periodische Veränderungen der Körperform können eine Verschiebung der mittleren Lage des Druckminimums bei schmalen Fischkörpern bewirken. Die in diesen Versuchen beschränkte Anzahl von Meßstellen und ihre gegebenen Postionen beweisen keineswegs, daß es bei Haien und Delphinen keine Verschiebung des Druckminimum gibt, die Farbfadenversuche am Haifischmodell sprechen eher dafür.

Immerhin hat die Wahl der Meßstellen zur Entdeckung des Zwischenmaximums geführt. Erst die Einrichtung der Meßstelle am Schwanz ($^{x}/L = 1$) machte diese Erscheinung meß- bzw. sichtbar. Das Fehlen dieses Meßpunktes bei den Makrelenmodellen verhinderte eine Beobachtung des Phänomens. Es ist aber anzunehmen, daß es hier gleichfalls existiert. Die Experimente mit dem Hai- und Delphinmodell zeigten eindeutig, daß bei periodischen Formveränderungen die Verteilung des Druckes zu bestimmten Zeitpunkten der Periode Zwischenmaxima aufweist. Sowohl die einfache Schwingung wie auch die scombridiforme Bewegungen haben prägenden Einfluß auf den Verlauf des Druckes. Bei einfacher Schwingung schwankt der Druck im letzten Meßpunkt während eines Zyklus relativ mehr als bei scombridiformer Bewegungsweise. Bei dieser Bewegung fällt der Druck nach dem Erreichen des Zwischenmaximums weniger steil, aber in allen Bewegungsphasen um einen ähnlichen Betrag ab. Die Bedeutung des Zwischenmaximums für das Strömungsverhalten wird in Kap. 7.4. diskutiert.

Der Druckabfall zum letzten Meßpunkt bringt es mit sich, daß der Wert

an dieser Stelle niedriger ist als bei stationärer Strömung ist. Dieses tritt bei reduzierten Frequenzen $\Sigma \geq 0{,}5$ deutlich zutage.

Der Druck weist über den hinter der Körpermitte liegenden Meßstellen regelmäßig wiederkehrende Schwankungen innerhalb der Bewegungszyklen auf. Die Größe der Schwankungen ist enger mit der Frequenz ω gekoppelt als mit der Strömungsgeschwindigkeit v_0. Für künftige Experimente folgt, daß die auf der Frequenz basierende Kennzahl stärkere Berücksichtigung finden muß. Die Reynolds-Zahl, bzw. die in ihre enthaltene Strömungsgeschwindigkeit, spielt bei beweglichen Körpern nicht die überragende Rolle, welche man von starren Körpern kennt.

Die Druckschwankungen entlang des Antriebsorgans werden durch Mechanismen hervorgerufen, die über das in der stationären Bernoullischen Gleichung erfaßte Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit und hydrodynamischen Druck hinausgehen. Dennoch ist es denkbar, daß eine "erweiterte Bernoullische Gleichung", etwa in der Form

$$p_\infty - p = 1/2\, \rho\, (v_\infty^2 - v_0^2 + \Theta)$$

die Ermittlung der Geschwindigkeit in der Außenströmung bei periodischer Formveränderung ermöglicht, indem der Druck an der Wand, die ja unterhalb der Grenzschicht liegt, gemessen wird. Die Größe Θ ist eine Funktion der Frequenz ω und der Wellenlänge λ_b, d.h. von Ort und Zeit abhängig.

$$\Theta = f\,(\omega, \lambda_b)$$

Die so erweiterte Bernoullische Gleichung gäbe dann Auskunft, wann und wo die Strömung entweder beschleunigt oder verzögert wäre. Dies ist ein mathematische Problem, das in der theoretischen Strömungsmechanik noch zu lösen sein wird. Lighthill (1977) meint dazu: "The hydrodynamic interaction between a swimming fish and the water is a good example of a problem where, although a correct mathematical expression of the laws of

motion has been known for over a century, any direct numerical calculation of the motion from those laws is far beyond the capacity of any existing computer".

7.4. Das Umschlagverhalten der Strömung bei beweglichen Körpern

Die Versuche, in denen die Strömung bei den beweglichen Modellen sichtbar gemacht wurden, haben Anzeichen für eine Beeinflussung der Strömung geliefert, ohne Aufschluß über die Ursache zu geben. Die Druckmessungen erweisen sich als ergiebiger. Das Auftreten von Zwischenmaxima gibt einen Annaltspunkt für die Ursache zur Verschiebung des Umschlags in der Grenzschicht, wie aus folgendem Gedankengang hervorgeht:

Spätestens seit Hertel (1963) wird diskutiert, ob die Rumpfform schnell schwimmender Wirbeltiere, z.B. aus Gründen der Energieersparnis in den Flugzeugbau Eingang finden kann, da diese Rümpfe das größtmöglichste Volumen bei gegebenem Widerstand "transportieren" können. Weiterhin jedoch besteht die Forderung, daß ein Flugzeug bei den verschiedenen Anströmverhältnissen noch flugfähig bleibt. Die Form, welche diesen Anforderungen entspricht, ist in Abb. 39 skizziert.

Am Körper der schnell schwimmenden Wirbeltiere hingegen ist der größte Körperdurchmesser nach hinten verschoben (Abb. 40). Bei starrem Körper wird die Außenströmung dadurch länger beschleunigt und sorgt für die Laminarisierung der Grenzschicht und bringt gleichzeitig eine Verlagerung des Druckminimums nach rückwärts mit sich. Hinter dem größten Durchmesser wird sich der Druck wieder erhöhen. Dabei schlägt die Strömung erfahrungsgemäß um und kann so dem Druckanstieg besser Stand nalten ohne abzureißen. Dieser Strömungsverlauf ist allerdings an eine parallel zur Längsachse einkommende Strömung geknüpft. Flugzeuge werden auch aus anderen Richtungen angeströmt. Deswegen lassen sich Überlegungen, die Rumpfform schnell schwimmender Wirbeltiere in die Flugzeugkonstruktion zu übernehmen, nicht realisieren.

Wenn der Druck hinter dem größten Körperdurchmesser weiterhin sinkt, d.h. wenn die Außenströmung erneut beschleunigt wird, braucht theoretisch die Strömung nicht turbulent zu werden. Ein Körper, welcher diesen Vorgang durch seine Form herbeiführen könnte, müßte z.B. folgendes Aussehen haben (Abb. 41a).

Die Strömung wird bis auf die Höhe des größten Durchmessers beschleunigt, danach verzögert. Es kommt zu einem Druckanstieg, welcher jedoch auf eine kurze Strecke beschränkt bleibt. Auf Höhe des Pfeiles wird der Umfang des Körpers wieder größer, d.h. die Strömung wird erneut beschleunigt. Der hydrodynamische Druck entwickelt sich dementsprechend; nach dem Pfeil steigt er wieder an, erreicht ein Zwischenmaximum auf Höhe des Pfeiles und fällt dann wieder ab.

Diese hypothetische Köprerform kommt bei schnell schwimmenden Wirbeltieren nicht vor. Dennoch ist in der Natur die Existenz eines Zwischenmaximums zu beobachten. Die Beobachtungen geben Anlaß zu der Hypothese, daß die periodischen Formveränderungen offenbar in Verbindung mit der durch die Antriebsbewegungen gesteigerten Strömungsgeschwindigkeit das gleiche Phänomen erzeugen. Der neuerliche Druckabfall hinter dem Zwischenmaximum verhindert allem Anschein nach einen Umschlag der Strömung in der Grenzschicht.

In den durchgeführten Versuchen erweckt die geringe Anzahl von Meßstellen den Eindruck, als gäbe es nur ein Zwischenmaximum entlang des Körpers. Es ist durchaus denkbar, daß es davor und dahinter weitere Druckanstiege gibt, die in ihrer Gesamtheit einen Umschlag entlang des gesamten Körpers völlig verhindern. Weiterhin ist durch diese Meßanordnung nicht prüfbar, ob die Lage des einen Zwischenmaximums während einer Periode wandert (Abb. 41b). Die Auswirkung auf das Strömungsverhalten wäre dann "kontinuierlicher".

Demzufolge ist neben der Lage des Zwischenmaximums der Zeitpunkt, in welchem es innerhalb einer Periode auftritt, von Interesse. Eine ein-

deutige zeitliche Zuordnung konnte aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse nicht getroffen werden. Augenscheinlich ist das Vorhandensein des erneuten Druckabfalls in einem Punkt nicht zu allen Zeiten der Periode erforderlich. Da das Entstehen einer hemmenden Wirbelzone in der Strömung eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, ist es anzunehmen, daß selbst ein nur zeitweise, örtlich auftretendes Zwischenmaximum zur Verminderung des Widerstandes führt. Diese Annahme wird durch das in den Filmen gezeigte Verhalten der Grenzschicht gestützt. Man erkennt die periodische Vor- oder Rückverlagerung des Auffächerungsgebietes des Farbfadens (Kap. 7.1.2.). Die Rückverschiebung geht synchron mit der Schlagbewegung zur Farbseite hin.

Weiterhin scheint für die Verschiebung des Umschlags wesentlich zu sein, wie steil der Druck hinter dem Zwischenmaximum abfällt. Die Untersuchungen zeigen jedenfalls, daß die Neigung der Kurve von der Art der Bewegung abhängt. Bei einfacher Schwingung ist der Druckabfall größer als bei scombridiformer Bewegung. Wenn ein zu steiler Druckabfall, ähnlich wie in der stationären Strömung, auch bei instationärer Strömung eine Ablösung hervorruft; dann läßt sich die Bevorzugung der scombridiformen Bewegungsweise gegenüber der einfachen Schwingung auch mit hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten begründen. Seit 1873 ist bekannt, "that the body is nearly always bent into a double or sigmoid curve and not into the arc of a circle as described by Borelli" (Gray, 1968).

Darüber hinaus stellt sich hier die Frage, ob die besonderen Bildungen am Schwanzstiel (Kiele, Finlets) ebenfalls eine derartige Funktion (wie die Bewegungen) auszuüben in der Lage sind oder eine Annäherung an das o.g. theoretische Profil darstellen.

Delphine und Haie besitzen auf beiden Seiten des in Schlagrichtung schmalen Schwanzstiels je einen Kiel, der aus Bindegewebe besteht und dessen volle Breite nicht etwa als Hebelarm der Muskeln ausgenutzt wird, sondern hauptsächlich biegeleichtes Material enthält. Bisher wurde vermu-

tet, daß die Kiele als "boundary layer fences" fungieren (Bone, 1975). Von der Anschauung her scheint dem Betrachter die Funktion der Kiele deutlich. Man denkt an den spitz zulaufenden Bug eines schnellen Schiffes, der das Wasser besonders gut zu zerteilen vermag. Allerdings ist diese Betrachtung bei den Istiophoridae mit beidseitig 2 Kielen vollends sinnlos. Zudem herrschen an der Wasseroberfläche andere Bedingungen, als um einen von allen Seiten mit Wasser umgebenen Schwanzstiels.

Finlets kommen nur an den Schwanzstielen von Thunfischen und Makrelen vor. Sie liegen nicht in der Ebene des Schwanzschlages. In der Literatur werden sie funktionell den Mechanismen zur Verhinderung der Ablösung zugeordnet (Webb, 1975). Ihre Wirkung soll ähnlich den Schlitzen in der Frontpartie von technischen Tragflächen mit hoher Auftriebskomponente sein. Die Kiele sind bei diesen Tieren schwach ausgebildet.

7.5. Vergleich der eigenen Ergebnisse mit der Literatur und Diskussion

Die Widerstandsbestimmungen an Wirbeltieren mit scombridiformer Bewegung beschränken sich auf Gleitversuche (Lang u. Daybell, 1963) oder Messungen an toten Tieren (Richardson, 1936; Gero, 1952). Die Gleitversuche wurden mit Delphinen durchgeführt, die man trainiert hatte, nach einer Beschleunigungsphase eine Meßstrecke ohne Antriebsbewegungen zu passieren. Der Versuch wurde mit und ohne Stolperdraht durchgeführt. Über die Änderung der (negativen) Körperbeschleunigung wurde auf den Widerstand geschlossen. Der Widerstandsbeiwert entsprach in etwa dem einer turbulent umströmten ebenen Platte. Der Widerstand mit und ohne Stolperdraht war gleich, was bedeutet, daß die Grenzschicht an einem gleitenden Delphinkörper turbulent ist. Die Ergebnisse dieser wie auch anderer Versuche lassen sich mit Lang (1975) zusammenfassen: "The net results of this series of tests showed nothing unusual in the way of either low drag or high power".

Cousteau (1975) berichtet von Experimenten zum Verhalten von Delphinen im freien Meer. U.a. wurde ein Farbstoff am Körper eines Delphins befestigt, der sich im Wasser auflöst und Farbfäden erzeugt. Es war beabsichtigt, die Spur dieses Delphins in der Schule zu verfolgen. Das Fluoreszein löste sich aber so schnell auf, daß der Tierkörper hinter einer Farbwolke verschwnd. Auf diese Weise sind Aufnahmen verhindert worden, aufgrund deren man auf das Verhalten der Grenzschichtströmung hätte schließen können.

Purves hat 1969 eine Abbildung veröffentlicht, in welcher die Strömung in Relation zum Körper während verschiedener Phasen der Bewegung eingezeichnet ist. Die Arbeit läßt aber offen, ob die Skizzen des Strömungsverlaufs hypothetischer Natur oder experimentell gewonnen sind. Diese Darstellung der Strömung zu verschiedenen Phasen ist auch im British Museum (Natural history) ausgestellt. Die von Purves angegebenen Stromlinienmuster konnten in meinen Versuchen nicht verifiziert werden.

Clauss und Affeld (1968) haben versucht, die von Purves entwickelte Hypothese von der Übereinstimmung der Hautstruktur von Delphinen und den Strömungslinien in einem Experiment mit einem beweglichen Delphinmodell zu erhärten. In ihren Experimenten wurde die Oberfläche des Modells mit Vaseline bestrichen und mit Kaliumpermanganat-Kristallen bestreut. Diese Kristalle lösten sich im Wasser auf und bilden Farbfäden. Die Verfasser weisen darauf hin, daß sich ihre Strömungsaufnahmen nicht mit der Hautstruktur decken. Die Versuche führten aber zu der Hypothese, daß z.B. Blasloch und Rückenflosse keine Störung der Strömung darstellen. In meinen Filmen ist ebenfalls keine Beeinflussung der Strömung durch die Rückenflosse beobachtet worden. Clauss und Affeld berichten weiter, daß die Stromlinien am beweglichen Schwanzstiel einen gebogenen Verlauf zeigen. Nach meinen Unter-suchungen muß diese Aussage differenziert werden. Es ist in diesem Zusammenhang wichtig, wo der Farbfaden seinen Ursprung hat. Beginnt er am Rostrum, so verläuft das Farbband über dem

beweglichen Schwanzstiel gradlinig. Liegt die Farbquelle hinter dem größten Körperdurchmesser, folgt das Farbband den Schwanzbewegungen des Delphinmodells und ist dann natürlich gebogen. Die Verteilung des hydrodynamischen Druckes an starren Körpern wird von Purves et al. (1975) und von Aleyev (1977) beschrieben und soll mit eigenen Ergebnissen über die stationäre Strömung verglichen werden.

Aleyev hat ebenfalls den Druckbeiwert über der Körperlänge verschiedener Modelle bestimmt. Demnach ist bei Scombroiden das Druckminimum im Bereich $^{x}/L = 0,44$. Im Anschluß daran steigt der Druck stetig an. Im letzten Meßpunkt $^{x}/L = 0,93$ ist der Druckbeiwert zwar im positiven Bereich, aber noch weit unter dem rostralen Wert. An dem hier untersuchten Makrelenmodell ist das Druckminimum bei $^{x}/L = 0,41$ und niedriger als bei Aleyev. Im letzten Meßpunkt $^{x}/L = 0,85$ ist der Druck ebenfalls geringer.

Aleyev Ergebnisse der Druckverteilung entlang der Seite eines Delphinmodells sind in Abb. 5 wiedergegeben. Zum Vergleich werden die Werte der dorsalen Meßstellen herangezogen. Das Druckminimum liegt demnach in Höhe der Meßstelle $^{x}/L = 0,43$. Das kommt dem Ort des geringsten Druckes meiner Messung ($^{x}/L = 0,5$) sehr nahe (Abb. 37). Die Druckwerte unterscheiden sich insofern, als daß die Werte aus meiner Untersuchung niedriger sind. Der Grund dafür kann die abweichende Lage der Meßstelle sein. Je näher die Meßstelle am Ort der größten Körperwölbung plaziert ist, desto geringer ist der Druck.

Der letzte dorsale Meßpunkt bei Aleyevs Delphinmodell ist $^{x}/L = 0,93$ und der dazugehörige Druck ist bis nahe zur Nullinie angestiegen, während der Druck der entsprechenden lateralen Meßstelle schon deutlich im positiven Bereich liegt. Aleyev gibt dafür keine Erklärung. Nach der Bernoullischen Gleichung zeigt die Beobachtung geringere Strömungsgeschwindigkeit an den Körperseiten an. Der Schwanzstiel des Delphin ist durch die dorso-ventralen Kiele 2,5-mal so hoch wie breit, d.h. die dorsale Strömung hat einen größeren Weg zurückzulegen, was zu einer Druckverminderung

führt. Zudem werden nach meinen Untersuchungen die Druckwerte auch durch die Stellung der Körperlängsachse zur Strömung beeinflußt (Abb. 36).

Die von mir erzielten Ergebnisse stimmen insofern mit den dorsalen Druckmessungen überein, als daß meine Werte im vergleichbaren Körperabschnitt ebenfalls im Bereich der Nullinie liegen.

Für instationäre Vorgänge kann nur die Arbeit von DuBois et al. (1974) herangezogen werden. Wie in Kap. 5 schon beschrieben, sind Druckmessungen an lebenden Blaufischen durchgeführt worden (Abb. 18). Diese offenbar über den Gesamtzyklus gemittelte Druckkurve weist in $^{x}/L = 0,32$ ein Minimum auf. Zwischen $^{x}/L = 0,32$ und $^{x}/L = 0,65$ steigt der Druck wieder an. Im Anschluß daran sinkt der Druck bis $^{x}/L = 0,82$, dem letzten Meßpunkt, wieder ab.

Ein direkter Vergleich der Meßwerte mit meinen Ergebnissen ist nicht angebracht, weil DuBois et al. nur den absoluten Druck angeben, insbesondere aber weil er Mittelwerte wiedergibt, ohne weitere Informationen über die Schwankungen während des Zyklus. Die Arbeit von DuBois et al. hat zwei wesentliche Ergebnisse erbracht:

a) daß der über einer Periode gemittelte Druck bei einem lebenden, sich bewegenden Tier unter dem Druck um einen toten, starren Tierkörper liegt.

b) daß ein Zwischenmaximum des Druckes auch in der Natur vorkommt.

Die gleichen Phänomene kommen auch in den hier vorgelegten Untersuchungen zum Vorschein. Periodische Formveränderungen eines Körpers führen im Bereich des Gelenkes zwischen Schwanzstiel und Fluke zu einem stärkeren Unterdruck als beim starren Modell. Das erneute Absinken des Druckes ist Ausdruck einer weiteren Beschleunigung des umgebenden Mediums und beeinflußt den Umschlag der Grenzschichtströmung (Kap. 7.4.). Sie kann länger laminar bleiben.

Damit ist eine Änderung der Kräftebilanz verbunden. Die Kräfte, die als Reibung zwischen Grenzschicht und Körper wirken, gehen in den Ge-

samtwiderstand ein und lassen ihn geringer werden als bei geometrisch ähnlichen, aber starren Körpern. Bei konstanter Schwimmgeschwindigkeit bedeutet diese eine Herabsetzung der zum Antrieb notwendigen Energie. Die Frage nach den funktionell-morphologischen Auswirkungen, z.B. auf die Belastung der Wirbelsäule kann in einer weiteren Arbeit, in welcher mehr Meßpunkte in mehreren Ebenen angebracht sind unter Verwendung des entwickelten Bewegungsmoduls angegangen werden.

8. Wahrnehmung des Druckfeldes durch die Tiere selbst

Bei Tieren, deren Körper periodischen Formveränderungen unterliegt, hat das Druckfeld für energiesparendes Schwimmen nach den vorstehenden Ausführungen erhebliche Bedeutung. Jetzt stellt sich die Frage, ob und wie ein Tier selbst Informationen über das Druckfeld erhält, in dem es sich bewegt. Diese Information ist natürlich für die Lokomotion wichtig, besonders, wenn man bedenkt, daß der Zustand des umgebenden Wassers recht verschieden ausfallen kann. Die pelagisch lebenden, schnell schwimmenden Wirbeltiere leben häufig in Schulen zusammen. Das heißt, Hunderte von z.B. Delphinen oder Thunfischen bewegen sich gemeinsam auf engen Raum. Damit ist ein ständiger Wechsel der Anströmverhältnisse verbunden. Selbst bei solitär lebenden Haifischen, wie z.B. Carcharodon carcharias ändern sich die Anströmverhältnisse, wenn es zur Annäherung an die eventuell flüchtende Beute kommt. Nur wenn diese registriert werden, kann die Bewegung so eingerichtet werden, daß es nicht zu widerstandserhöhenden Strömungszuständen kommt. Allein schon die Information über die momentane Schwimmgeschwindigkeit ist für effektives Schwimmen unerläßlich, weil eine optimale Wechselbeziehung zwischen Geschwindigkeit und Schlagfrequenz besteht und bestehen muß. Ein Grund ist z.B. die Abhängigkeit der Kraftentwicklung der Muskulatur von ihrer Kontraktionsgeschwindigkeit. Nach Wardle (1975) ist der Energieverbrauch in höchstem Maß von einer Abstimmung dieser

Parameter abhängig.

Als biologischer Druckrezeptor dürfte das den Fischen eigene Seitenlinienorgan fungieren, welches sich an beiden Körperseiten bis zu Flukenbasis erstreckt. Nach Ziswiler (1976) bewirken "feinste lokale Wasserströmungen über Poren minimale Flüssigkeitsbewegungen, die ihrerseits von Neuromasten perizipiert werden" (Abb. 42). Was die Tiere mit dem Lateralisorgan alles wahrnehmen, ist nicht völlig geklärt. Nach den Angaben von Kuiper (1967) kommt der hydrodynamische Druck, als spezifischer Reiz in Frage. Ohne weiter auf die offensichtlich nicht abgeschlossene Diskussion über die Funktion(en) des Organs näher einzugehen, soll auf die prinzipielle Ähnlichkeit des Lateralisorgans mit der verwendeten Apparatur zur Druckmessung hingewiesen werden. Über die Meßstellenöffnung pflanzt sich der hydrodynamische Druck wegen der Inkompressibilität des Wassers bis zu Meßdose fort. Kurzfristige Änderungen können fast ohne zeitlichen Verlust weitergeleitet werden, da sich der Druck im Wasser mit der Geschwindigkeit $c = 1460\ ms^{-1}$ ausbreitet, ohne daß dabei Bewegungen von Wassermassen als solche stattfinden.

Delphine, als höher entwickelte Säugetiere besitzen diese Sinnesorgane nicht, gleichwohl ist ihnen die uns Menschen bekannte Hautsensibilität eigen. Von Békésy (1967) bemerkt über die sensorischen Fähigkeiten der menschlichen Haut: "There is no pressure sensitivity in the human skin so long as the stimulus is hydrostatic pressure". Er fand aber, daß Änderungen des Druckes sehr wohl bemerkt werden (wie jeder überprüfen kann). Weiter beschreibt er recht eindrucksvoll, wie auch wir es lernen können, unter Wasser mit unseren Hautsinnen die Bewegung eines Gegenstandes zu verfolgen. Es ist denkbar, daß die Coriumpapillen (Abb. 8) in den flüssigkeitsgefüllten Kanälchen der Delphinhaut als Hilfsorgan der Druckrezeption dienen.

Alle schnellen Schwimmer besitzen demnach geeignete Rezeptoren um den hydrodynamischen Druck und seine Änderungen zu registrieren und den

jeweiligen Erfordernissen entsprechend zu reagieren. Bei Ichtoysaurier konnte aufgrund der versteinerten Funde von Skelettabdrücken keine Aussage über die Strömungsrezeptoren gemacht werden. In Analogie zu den rezenten Reptilien, die über Hautsensibilität verfügen, kann von einem leistungsfähigen Rezeptor für die ausgestorbenen Tiere ausgegangen werden.

9. Zusammenfassung

Das Schriftum über die Problematik des schnellen Schwimmers, hohe Reynolds-Zahl und Graysche Paradoxon wurde revidiert. Vertreter aller drei lebenden phylogenetisch verschiedenen Klassen von besonders schnellen Schwimmern weisen weitgehende Übereinstimmung morphologischer und kinematischer Merkmale auf. Für alle gilt die unter dem Namen 'Graysches Paradoxon' bekannte Diskrepanz zwischen ihrer Muskelleistung und der unerklärlich hohen Schwimmgeschwindigkeit.

Bone (1975), Webb (1975) stellen die große Anzahl von vorgeschlagenen widerstandsreduzierenden Mechanismen in Übersichten dar, ebenso die physiologisch relevanten Werte. Kein Ansatz vermochte jedoch bisher eine befriedigende Lösung des Paradoxons zu bringen.

Die in verschiedenen Wirbeltieren auftretenden, gemeinsamen Merkmale, wie Gestalt des Rumpfes, des Schwanzstiels, der Fluke und vor allem die Bewegungsform dürften für die Verminderung des Strömungswiderstandes eine wesentlich größere Bedeutung haben, als die bisher schon von mehreren Autoren erwogene Beeinflussung durch Strukturen der Körperoberfläche. Diese treten immer nur bei Vertretern bestimmter Tierklassen auf und sie sind keineswegs zwangsläufig an die auffallend konvergente Gesamtform der Tiere gekoppelt.

Im Gegensatz zu früheren Autoren Gray (1936), Richardson (1936), Lang (1966), Purves et al. (1975) wurde in der vorliegenden Arbeit nicht die Stromlinienform und auch nicht eine widerstandsmindernde Oberflächengestaltung, sondern der Einfluß der periodischen Veränderung der Körperform

auf die Strömung untersucht. Es wurde geprüft, ob durch eine Interaktion der Strömung und der Bewegungsform die Umströmung derart beeinflußt wird, daß der Strömungswiderstand letztlich geringer als an einem starren oder an einem nur passiv bewegten Körper ist.

Eigens für diese Experimente wurde ein Bewegungsmodul konstruiert. Es ermöglichte flexible Modelle aus Silikonkautschuk in rhythmische Bewegung zu setzen, und zwar sowohl in einfache Pendelschwingung des Schwanzstiels als auch in eine wellenförmige Bewegung, die von vorn nach hinten über den Körper läuft. Die Beachtung der Modellgesetze der Strömungsmechanik erlaubt die Übertragung der Modellergebnisse auf reale Tiere.

Durch Einbringen von Farbfäden in die Strömung konnte gezeigt werden, daß sich mit den periodischen Formveränderungen des Körpers der Umschlag der Strömung in Wirbelzonen gegenüber dem starren Körper verschiebt. Dieser bisher noch nicht beobachtete Sachverhalt ist an die allgemeine äußere Körperform, besonders aber an die den schnellen Schwimmern eigene Bewegungsform gebunden.

Zu verschiedenen Zeitpunkten des Bewegungszyklus wurde die Verteilung des hydrodynamischen Druckes entlang der Modellkörper ermittelt. Der hydrodynamische Druck an der Oberfläche ist Ausdruck der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Mediums. Bei starren Körpern ist er am Vorderende zunächst hoch, fällt dann auf ein Minimum ab und steigt bis zum Körperende wieder an. Im Schwanzbereich der beweglichen Körper herrschen, wie aus den Experimenten hervorgeht, deutlich andere Druckverhältnisse. Sowohl bei einfacher Schwingung als auch bei Körperwellenbewegung sinkt der Druck am Schwanzstielende wieder ab, statt kontinuierlich weiter zu steigen. Es treten also Zwischenmaxima im Druckverlauf auf. Bei Wellenbewegung fällt der Druck hinter dem Zwischenmaximum weniger steil ab. Das bedeutet ein bis hinter das Tier ständig steigende Beschleunigung der umgebenden Wassermassen, welche eine Wirkung auf die Grenzschichtströmung ausübt, die ein widerstandsärmeres Schwimmen erlaubt.

10. Literatur

Aleyev, Y.S., 1977, Nekton, Dr.W. Junk Publishers, The Hague

Bainbridge, R., 1961, Problems of fish locomotion, Symp. Zool. Soc. London, 5: 13 - 31

Békésky, von, G., 1967. Some similarities in sensory perception of fish and man, in: lateral Line Detectors, P. Cahn (ed), Indiana University Press, 417 - 435

Bone, Q., 1975, Muscular and energetic aspects of fish swimming, in: Swimming and flying in nature, Vol. 2, T.Wu. Ch. Brokaw u. C. Brennen (eds.), Plenum Press, New York und London, 493 - 528

Breder, C., M., 1926, Locomotion in Fishes, Zoologica, New York, 4: 159 ff

Clauss, G., 1968, Schlagflügel und Wirbelstraße, Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 7, Nr. 7

Clauss, G. u. Affeld, K., 1968, Biologisch-technische Untersuchung der Umströmung eines beweglichen Delphinmodells, ILTUB-Bericht, 68/17

Cousteau, J., Y., 1975, Delphine, Droemer Knaur-Verlag, Zürich, S. 36 ff

DuBois, A., Cavagna, G.A. u. Fox, R.S., 1974, Pressure distribution on the body surface of swimming fish, J. Exp. Biol., 60, 581 - 591

DuBois, A.B., Cavagna, G.A. u. Fox, R.S., 1975, The forces resting locomotion in Bluefish, in: Swimming and flying in nature, Vol. 2, T. Wu, Ch. Brokaw u. Ch. Brennen (eds.), Plenum Press, New York u. London, 541 - 551

Fierstine, H.L. u. Walters, V., 1968, Studies in locomotion and anatomy of Scombroid fishes, Mem. S. Calf. Acad. Sci. 6, 1 - 31

Gero, D.R., 1952, Power and efficiency of large saltwaterfish,
Aeron. Engineering Review, 1, 10 - 15

Gersten, K., 1974 , Einführung in die Strömungsmechanik,
Bertelsmann Universitätsverlag, Düsseldorf

Gray, J., 1936, The propulsive powers of the dolphin,
J.Exp. Biol., 13: 192 - 199

————, 1968, Animal Locomotion,
Weidenfeld u. Nicolson, London, Kap.2

Harris, J.E., 1938, The role of fins in the equilibrium of swimming fish,
J. Exp. Zool., 15: 32 - 47

Hertel, H., 1963, Struktur , Form und Bewegung,
Krauskopf-Verlag, Mainz

Hertrich, H. u. Wagener, J., 1967, Ein Verfahren zur Messung und automatischen Registrierung instationärer Druckverteilungen,
Aerodynamische Versuchsanstalt, Göttingen

Hill, A.V., 1950, The dimensions of animals and their muscular dynamics,
Sci. Prog., 38: 209 - ff

Hoerner, S.F., 1965, Fluid-Dynamic Drag,
Published by the Author, New Jersey

Hunter, J.R. u. Zweifel, J.R., 1971, Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude and size in jack mackerel, Trachurus symmetricus,
Fish. Bull., Washington, 69: 253 - 266

Kempf, G. u. Neu, W., 1932, Schleppversuche mit Hechten zur Messung des Wasserwiderstandes, Z. Wiss. Biol., C. 17: 353 - 364

Kramer, M.O., 1960, The Dolphins secret,
New Sci. , London, 7 : 1118 - 1120

Kuiper, J.W., 1967, Frequency characteristics and functional significance of the lateral line organ, in: Lateral Line Dectectors, P. Cahn (ed.),
Indiana University Press, 105 - 121

Lang T.G., 1966, Hydrodynamic analysis of cetacean performance,
in: Whales, Dolphins and Porpoises, K.S. Norris (ed.), University of Calf. Press, Berkeley, 410 - 432

Lang, T.G., 1975, Speed, power, and drag measurements of Dolphins and Porpoises, in: Swimming and Flying in Natur, Vol. 2, T. Wu, Ch. Brokaw u. Ch. Brennen (eds.), Plenum Press, New York und London, 553 - 572

Lang, T.G. u. Daybell, D.A., 1963, Porpoise performance tests in a seawater tank, Nav. Ord. Test Sta. Tech. Rep., 3063: 1 - 50

Liebe, W., 1963, Der Schwanzschlag der Fische, VDI-Z., 28: 1298 - 1302

Lighthill, J., 1970, Aquatic animal propulsion of high hydrodynamical efficiency, J. Fluid. Mech., 44: 265 - 301

Lighthill, J., 1977, Mathematical theories of fish swimming, in: Fisheries Mathematics, J. Steele (ed.), Academic Press, New York und London 131 - 144

Magnuson, J.J., 1979, Locomotion by scombroid fishes, in: Fish physiology, W.S. Hoar u. P. Randall (eds.) Vol. VII, Academic Press, New York, San Francisco, London, 240 - 808

Möller, R., 1974, Eine experimentelle Untersuchung zur technischen Nutzung des Delphinantriebes, Berlin, Diss. D 83

Nachtigall,W., 1977, Zur Bedeutung der Reynolds-Zahl und der damit zusammenhängenden strömungsmechanischen Phänomene in der Schwimmphysiologie und Flugphysik, in: Physiology of movements-Biomechanics, Fortschr. Zool., 24: 13 - 56, Fischer, Stuttgart

Norris, K.S. u. Prescott, J.H., 1961, Observation on Pacific cetaceans of California and Mexican waters, Univ. Calif. Publ. Zool., 63: 291 - 402

Parry, D.A., 1949, The swimming of whales and a discussion of Gray's Paradoxon, J. Exp. Biol., 26: 24 - 34

Pauwels, F., 1960, Eine neue Theorie über den Einfluß mechanischer Reize auf die Differenzierung der Stützgewebe, Z. Anat. Entw. Gesch., 121, 487 - 515

——, 1965, Gesammelte Abhandlungen zur Funktionelle Anatomie des Bewegungsapparates, Springer, Berlin-Heidelberg-New York

Prandtl, L., 1904, Über Flüssigkeitsbewegungen, Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Teil IV, Gustav Fischer, Jena

Prandt, L., Oswatisch, K. u. Wieghardt, K., 1969, Führer durch die Strömungslehre, Vieweg-Verlag, Braunschweig

Preuschoft, H., 1976, Funktionelle Anpassung evolutionierender Systeme, in: Aufsätze u. Red. senkenb. naturf. Ges., 18: 98 - 117

Preuschoft, H. u. Fritz, M., 1977, Mechanische Beanspruchung im Bewegungsapparat von Springpferden, in: Physiology of movements-Biomechanics, Fortschr. Zool., 24: 75 - 98

Purves, P.E., 1963, Locomotion in whales, Nature, 197: 334 - 337

———, 1969, The structure of the fluke in relation to laminar flow in cetacean, Z. Säugetierk., 34: 1 - 8

Purves, P.E., Dudok van Heel, W.H. u. Jonk, A., 1975, Locomotion in dolphines Part I: Hydrodynamic experiments on a modell, in: Aquativ Mammals, Nr. 3, Harderwijk

Rechenberg, I. u. Bienert, P., 1978, Widerstandsverminderung durch Oberflächenbehandlung eines Strömungskörpers mit makromolekularen Substanzen, TU Berlin

Reif, W.E., 1978, Protective and hydrodynamic function of the dermal skeleton of elasmobranchs, N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 157: 133

Richardson, E.G., 1936, The physical aspects of fish locomotion, J. Exp. Biol., 13: 63 - 74

Rosen, M.W. u. Comford, N.E., 1971, Fluid friction of fish slimes, Nature, 234: 49 - 51

Schmidt-Nielsen, K., 1972, Locomotion: Energy costs of swimming, running and flying, Science, 177: 222 - 228

———, 1977, Problems of Scaling Locomotion and Physiological Correlats, in: Scale effects in animal Locomotion, T.J. Pedley (ed.), Academic Press, New York und London, 1 - 21

Sokolov, V.E., 1973, Structure of skin cover in some Cetacea, in: Morphology and Ecology of Marine Mammals, John Wiley u. Sons, New York, Toronto

Stegemenn, J., 1977, Leistungsphysiologie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 80 u. S. 259

Swanson, W.M., 1965, Some observations on fish propulsion qualitative boundary layer considerations, Developments in Mechanics, Vol. 2, Part I: Fluid Mechanics

Ungerechts, B., 1975, Art und Größe der beim schnellen Schwimmen zu überwindenden Widerstände, als einfaches Beispiel: Heringshai, Staatsexamensarbeit

———, 1977, Windkanalmessungen an einem starren Haifsich-modell bei hohen Reynolds-Zahlen, in: Physiology of movements-Biomechanics, Fortschr. Zool., 24: 177 - 181

Videler, J.J. u. Wardle, C.S., 1978, New kinematik data from high speed film recordings of swimming cod (Gadus Morhua), N.J. Zool,, 28: 465 - 484

Voronin, L.G. u. Sokolov, V.E., 1973, Survey of data on dolphins, in: Morphology and ecology of marine mammals, John Wiley u. Sons, New York, Toronto

Wainwright, S.A., Vosburgh, F. u. Hebrank, J.A., 1978 Shark skin: Function in locomotion, Science, 202: 747 - 749

Walters, V., 1962, Body form and swimming performance in scombroid fishes, Am. Zool., 2: 143 - 149

Wardle, C.S., 1975, Limit of fish swimming speed, Nature, Lond., 255: 725 - 727

Wardle, C.S. u. Videler, J.J., 1980, How do fish break the speed limit? Nature, 284: 445 - 447

Webb, P.W., 1975, Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, Bull. Fish Res. Bd. Canada, 190, Ottawa

Wilkie, D.R., 1960, Man as a source of mechanical power, Ergonomics, 3: 1

Woodcock, A., 1948, The swimming of dolphins, Nature, 161

Wu, T.Y., 1977, Introduction to the scaling of aquatic animal locomotion, in: Sclaing effects in animal locomotion, T.J. Pedley (ed.), Academic Press, 203 - 232

Yuen, H.S.H., 1966, Swimming speeds of yellowfin and skipjack tuna, Trans. Am. Fish. Soc., 95: 203 - 209

Ziswiler, V., 1976, Spezielle Zoologie, Wirbeltiere, Thieme Verlag, Stuttgart, S. 52

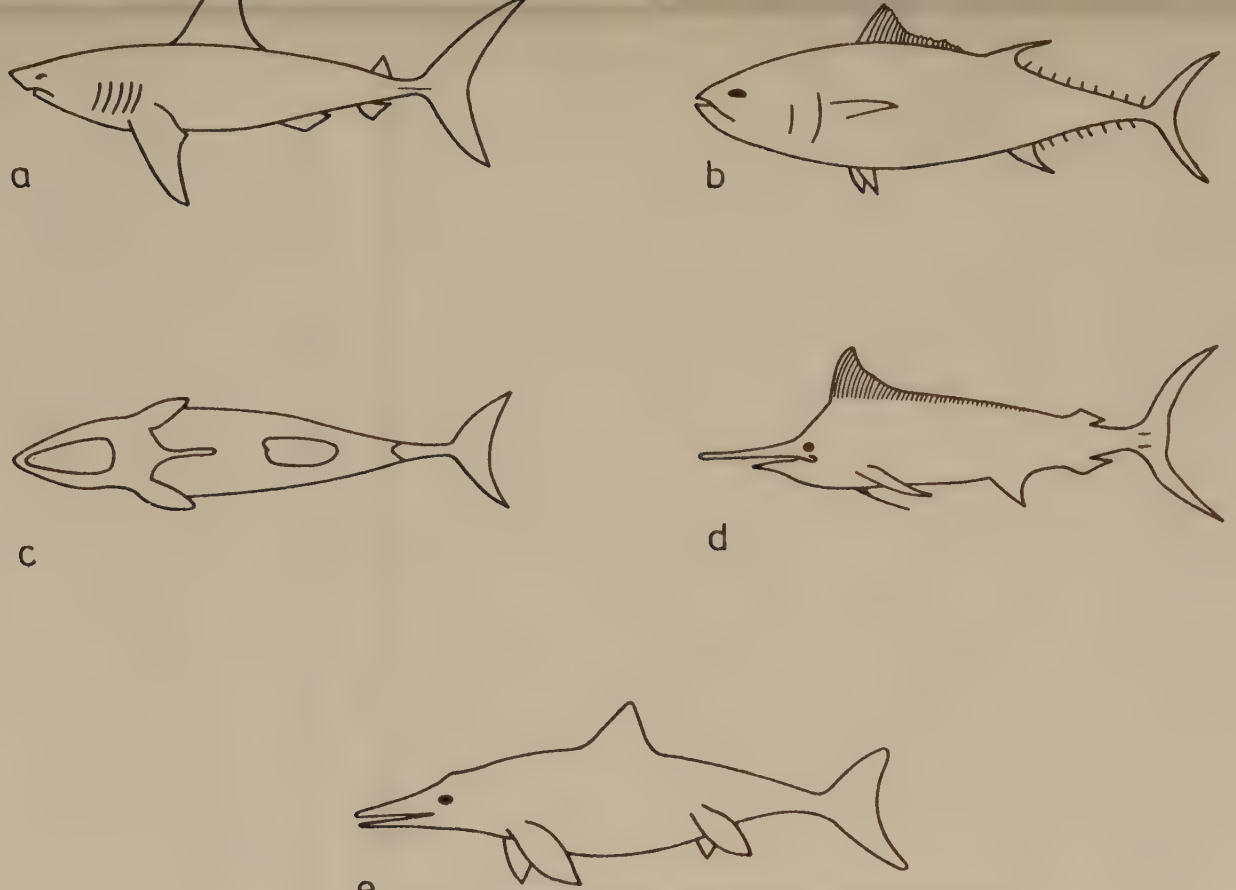


Abb. 1 Körperprofile schnell schwimmender Wirbeltiere
a) Lamna nasus, b) Euthynnus pelamis, c) Orca orca,
d) Makaira indica, e) Ichtyosaurus †

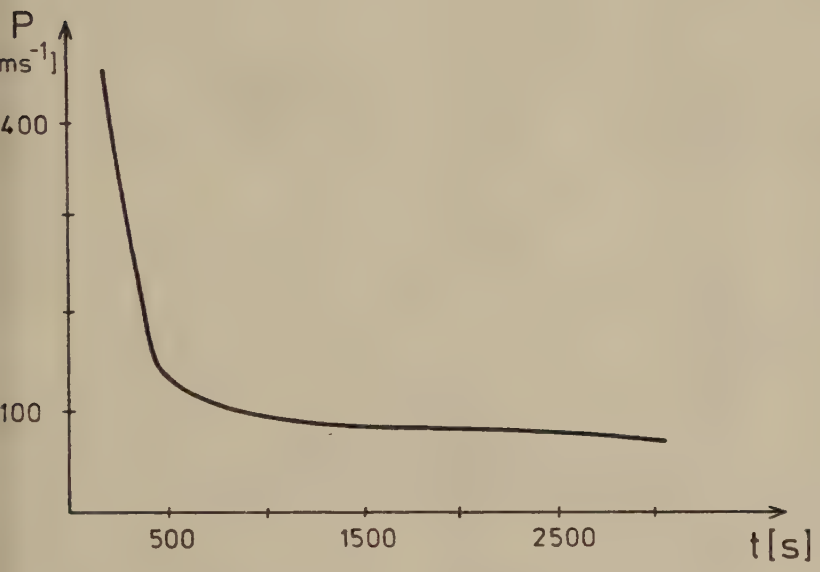


Abb. 2 Leistungs-Zeit-Kurve (n. Stegemann, 1977)

P: Leistung, t: Zeit

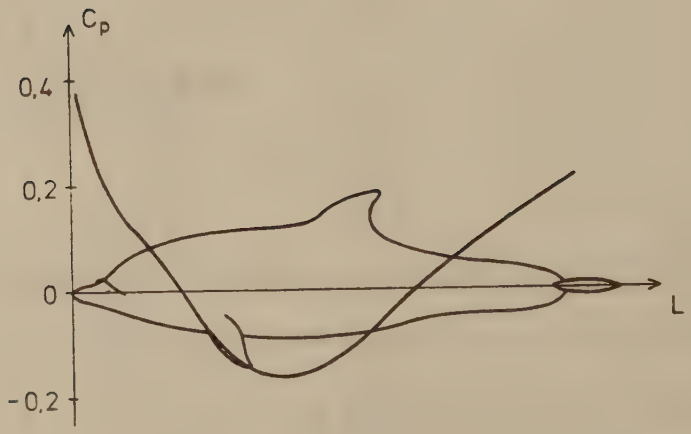


Abb. 5 Verteilung des Druckbeiwertes c_p bei einem stromlinienförmigen, starren Körper über der Körperlänge L, (n. Aleyev, 1975)

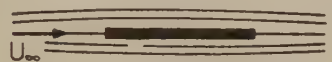
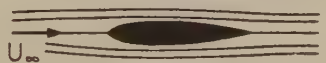
Körper	Druckwiderstand	Reibungswiderstand
	0 %	100 %
	≈ 10 %	≈ 90 %
	≈ 90 %	≈ 10 %
	100 %	0 %

Abb. 6 Widerstandsanteile verschiedener Körperformen bei gegebener Anströmgeschwindigkeit v_0, (n. Gersten, 1974)

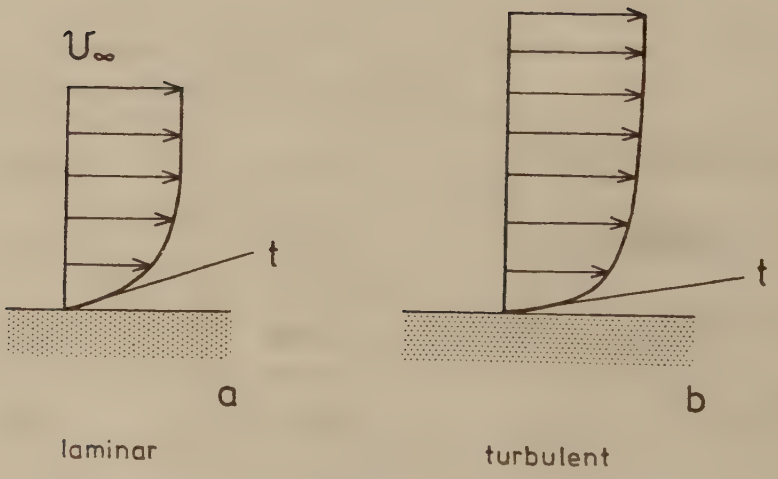
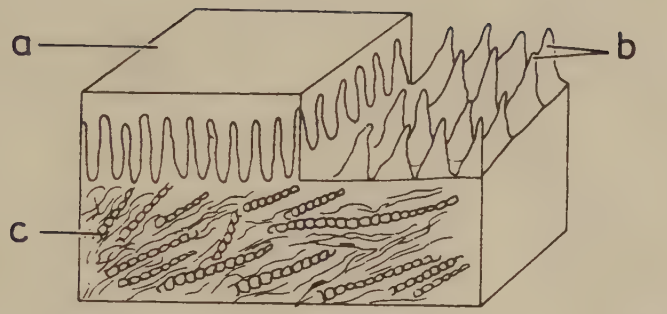
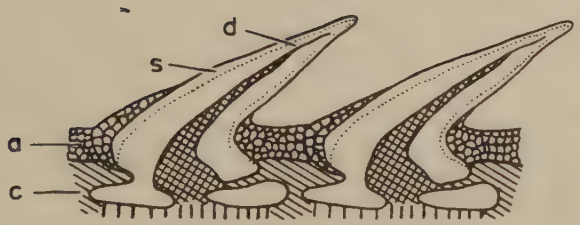


Abb. 7 Geschwindigkeitsverteilung in
a) laminarer Strömung
b) turbulente Strömung

(n. Gersten, 1974)



a)



b)

Abb. 8 Schematische Darstellung

a) der Delphinhaut

b) der Hautzähnchen bei Haifischen

a: Epidermis, b: Dermalpapillen, c: Corium und Subcutis,

d: Dentin, s: Schmelz

Abb. 9 Querschnitte

a) durch den Schwanzstiel eines schnell schwimmenden Wirbeltieres mit halbmondförmiger Fluke

b) durch einen Lappen der Fluke mit tragflächenförmigem Profil

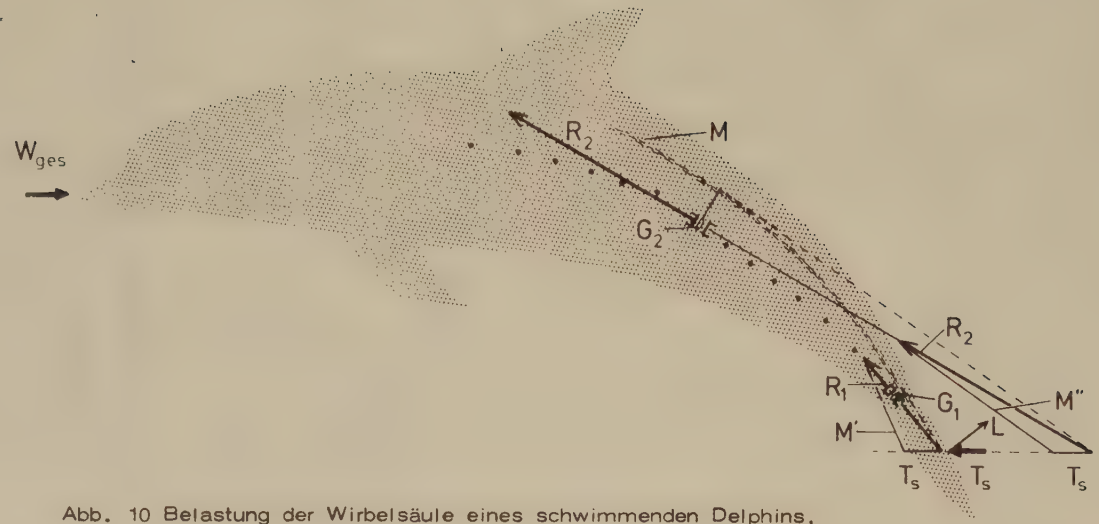


Abb. 10 Belastung der Wirbelsäule eines schwimmenden Delphins,
G_1, G_2: Zwischenwirbelgelenke, M: Rückenmuskulatur,
M', M'': Wirkungslinien der Muskelkraft, W_{ges}: Summe der bremsenden Kräfte,
T_s: Schub, R_1, R_2: Resultanten aus (T_s, M)

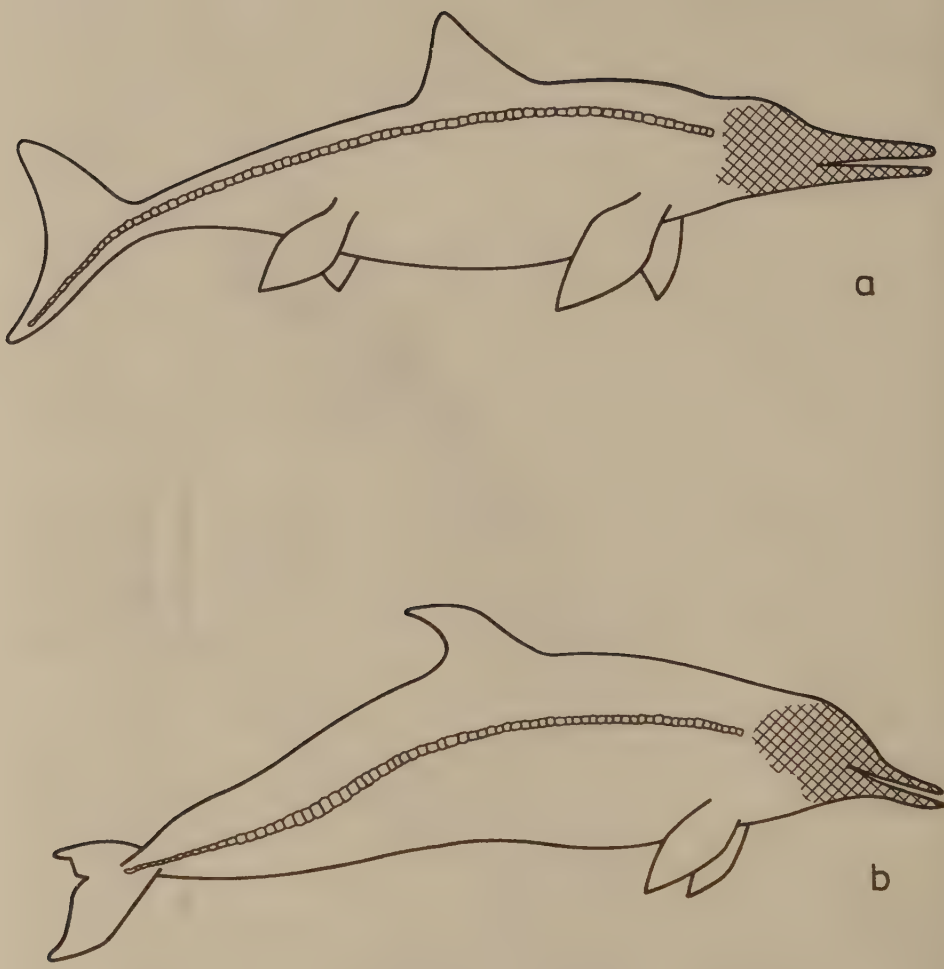
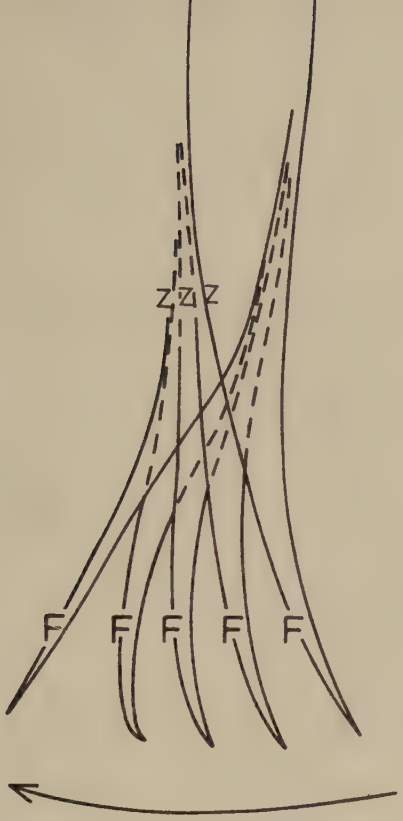


Abb. 11 Lage der Wirbelsäule und Größe der Wirbelkörper bei

a) Ichtyosaurus

b) Tümmler, Tursiops truncatus



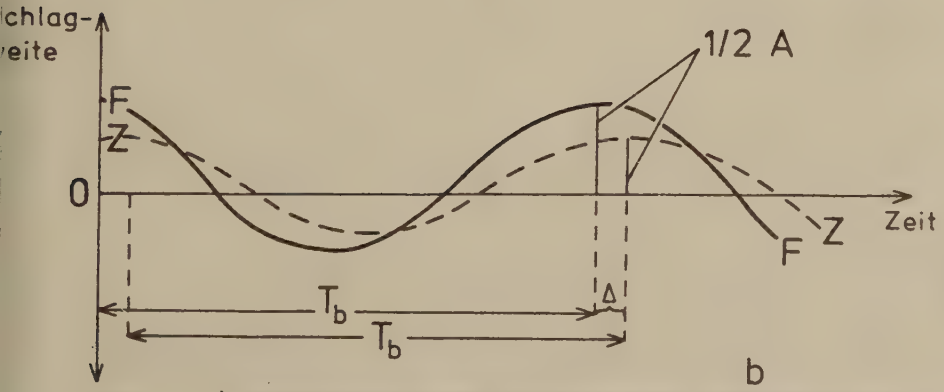


Abb. 12 a) Bewegungsskizze des Schwanzstiels bei carangiformer Bewegung im körperbezogenen System, einen halben Zyklus zeigend (n. Gray, 1968)

b) Weg-Zeit-Kurven von 2 Körperpunkten, eines Körpers mit wellenförmiger Formveränderung

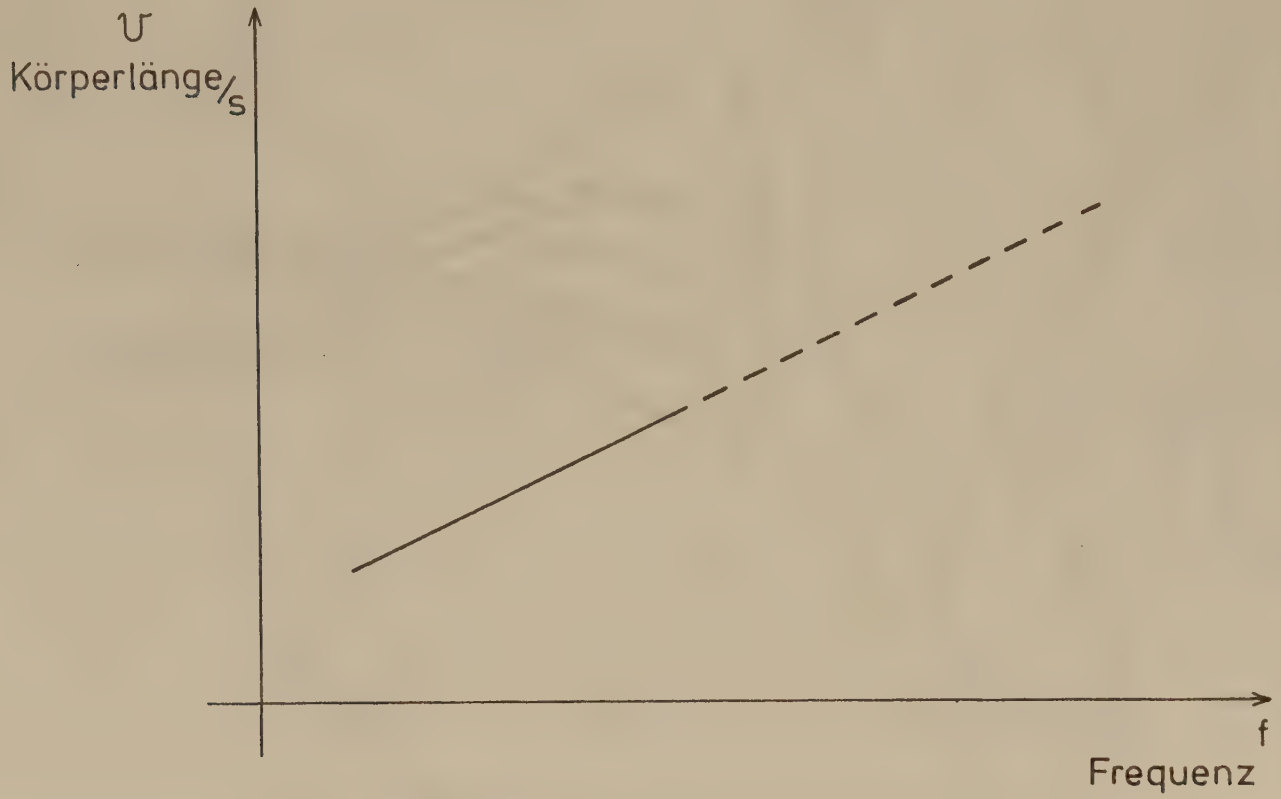


Abb. 13 Regressionsgrade eines Geschwindigkeits-Frequenz-Diagramms für einen Thunfisch, Euthynnus. (n. Yuen, 1966)

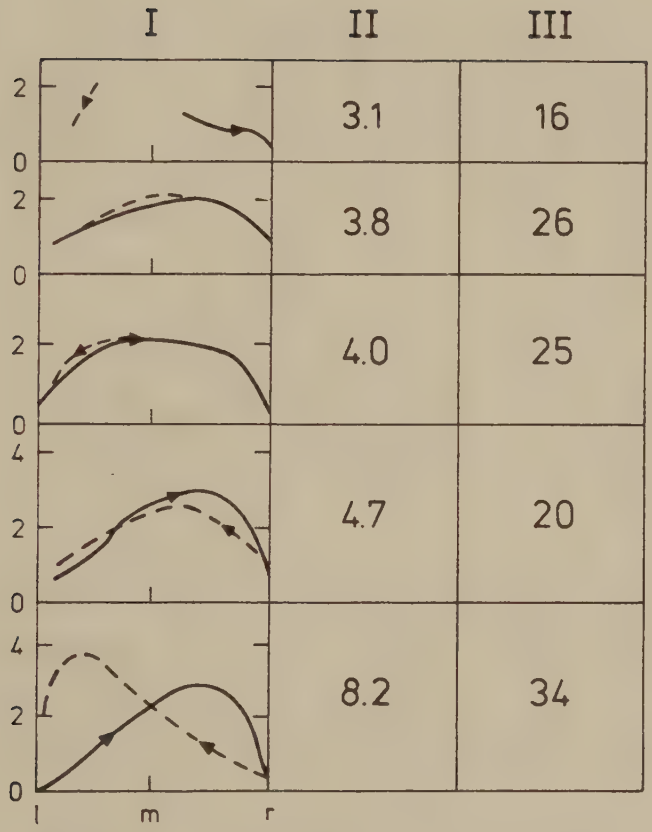


Abb. 14 I) Diagramme der transversalen Geschwindigkeit (Ordinate) des Schwanzes während eines Zyklus vom linken Umkehrpunkt (l) über die Körperlängsachse (m) zum gegenüberliegenden (r)

II) Schwimmgeschwindigkeit $v_0 = Ls^{-1}$

III) Amplitude $A = \% L$

(n. Magnuson, 1975)

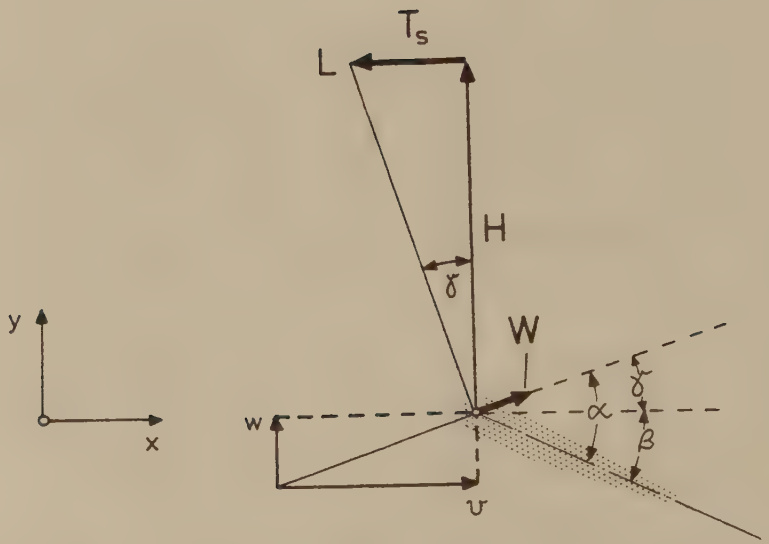


Abb. 15 Winkelbeziehungen an einer angeströmten, beweglichen Fluke, die gerade aufwärts geschlagen wird,

υ_0 : Schwimmgeschwindigkeit, w: transversale Geschwindigkeit,

β : Drehwinkel, γ : Anströmwinkel, α : Anstellwinkel,

W_{ges}: Widerstand, L: hydrodynamischer Auftrieb, T_s: Schub,

x: Schwimmrichtung

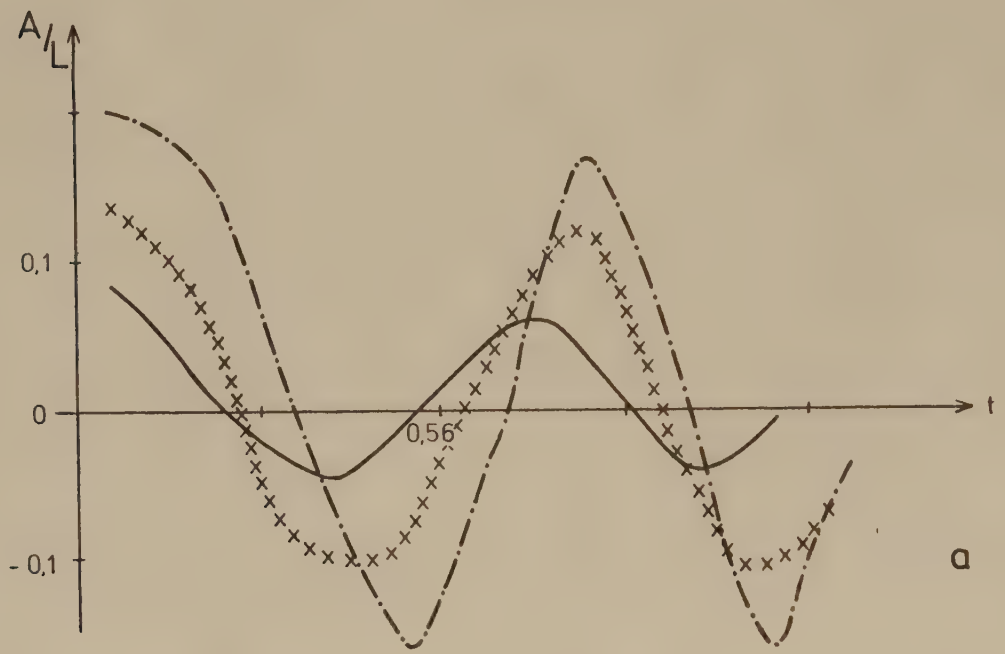
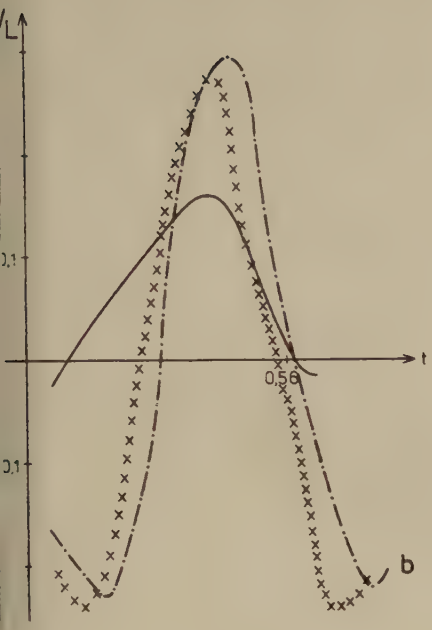


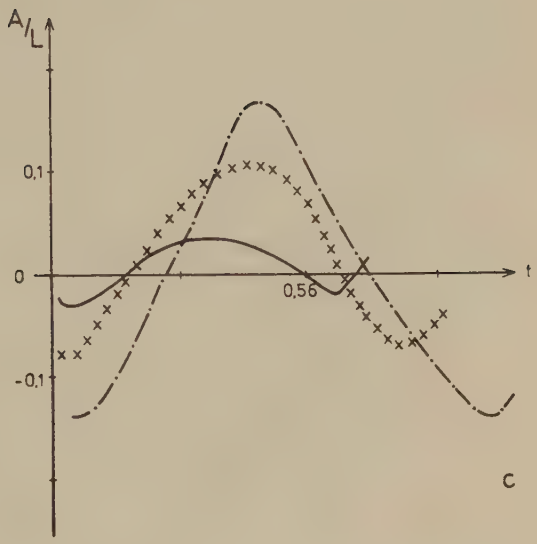
Abb. 16 sechs (a-e) Weg-Zeit-Kurven von schwimmenden Delphinen im körperbezogenem System

—·—·— Flukenspitze

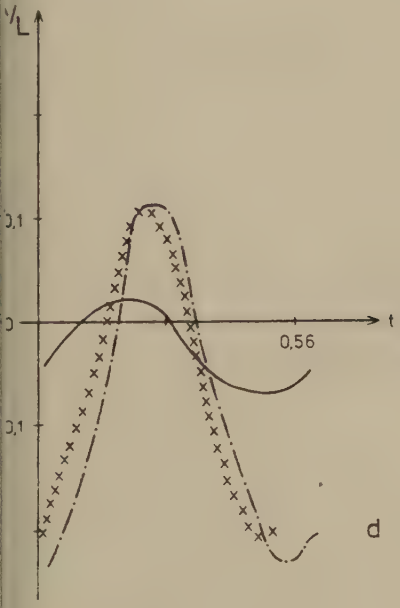
XXXXX Flukenbasis



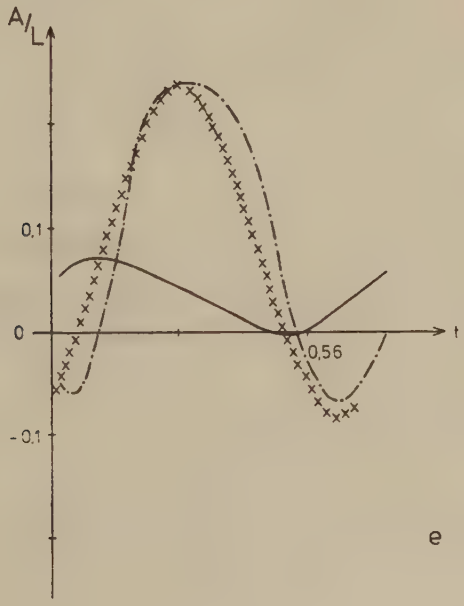
b



c



d



e

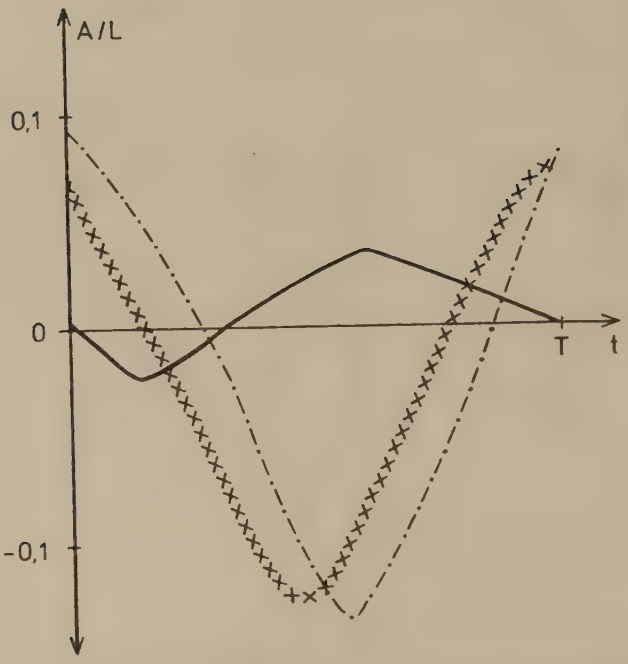


Abb. 17 Weg-Zeit-Kurve eines schwimmenden Thunfisches, Sarda chiliensis im körperbezogenem System

——— Körperpunkt: x/L = 0,56

xxxxx Flukenbasis: x/L = 0,87

—·—·— Flukenspitze

t: Zeit, A/L: relative Amplitude, T: Periodendauer

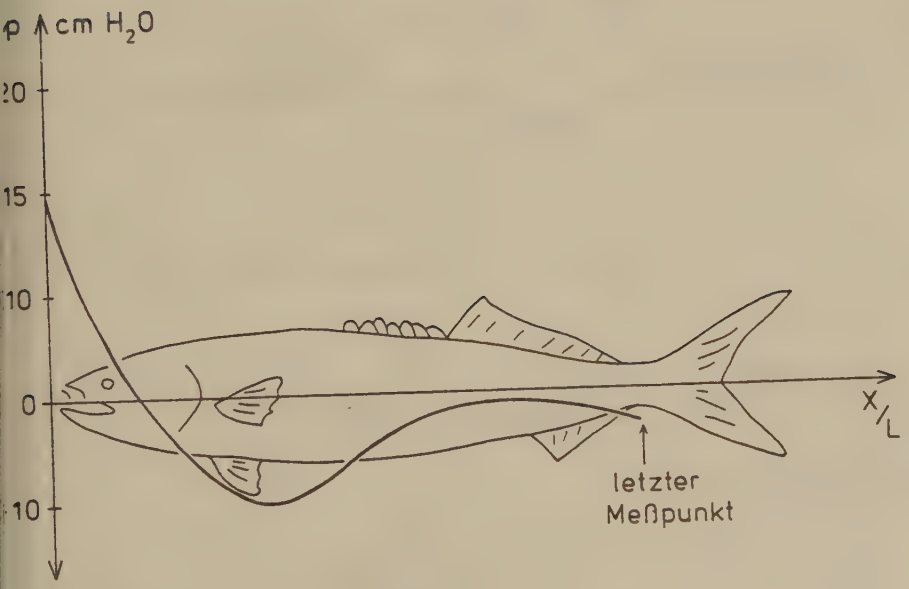


Abb. 18 Verteilung des hydrodynamischen Druckes p an einem schwimmenden Blaufisch (Pomatomus saltatrix) in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L, dorsale Meßreihe

(n. DuBois et al. 1974)

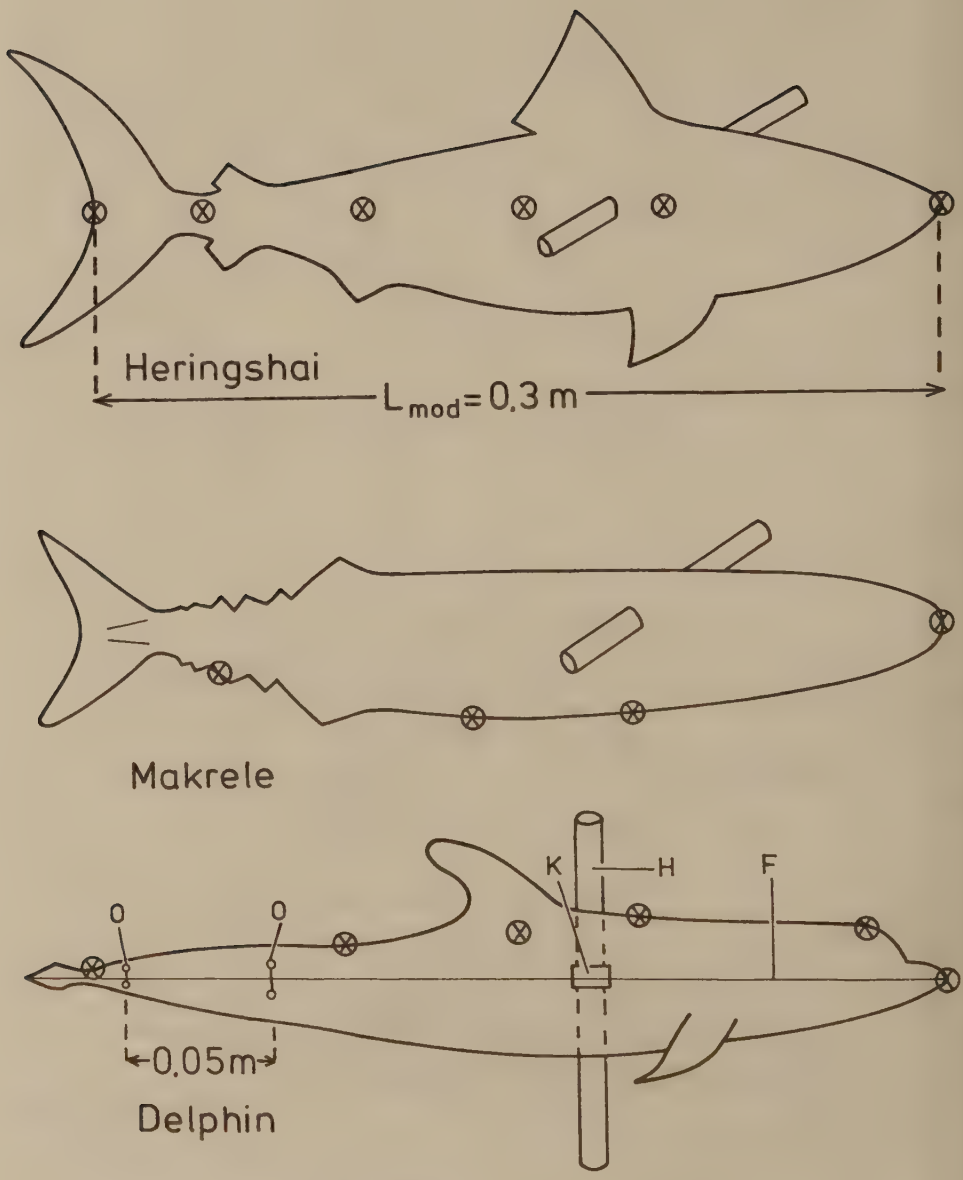


Abb. 19 Modelle in Seitenansicht

H: Halterungsrohr, F: Federblech, K: Kontermuttern, O: Ösen,

⊗ : Meßstellen

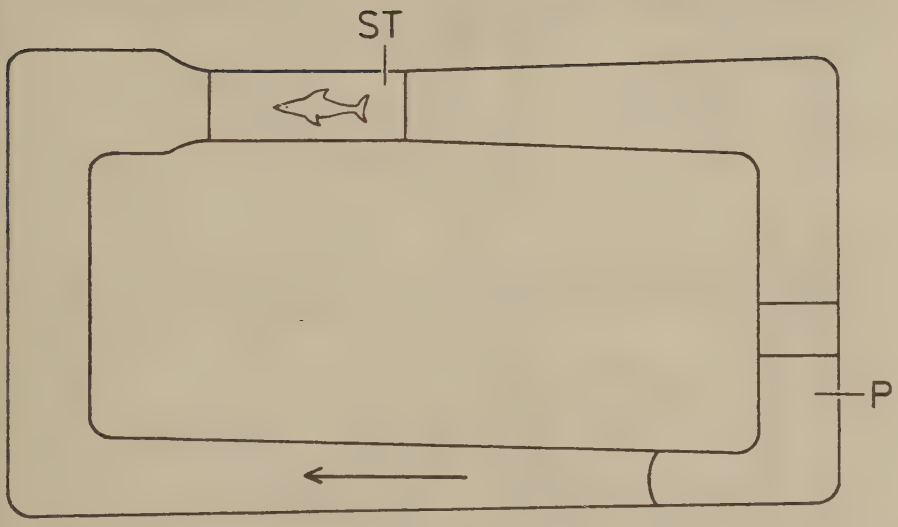


Abb. 20 Wasserkanal

ST: Meßstrecke, P: Propellerpumpe

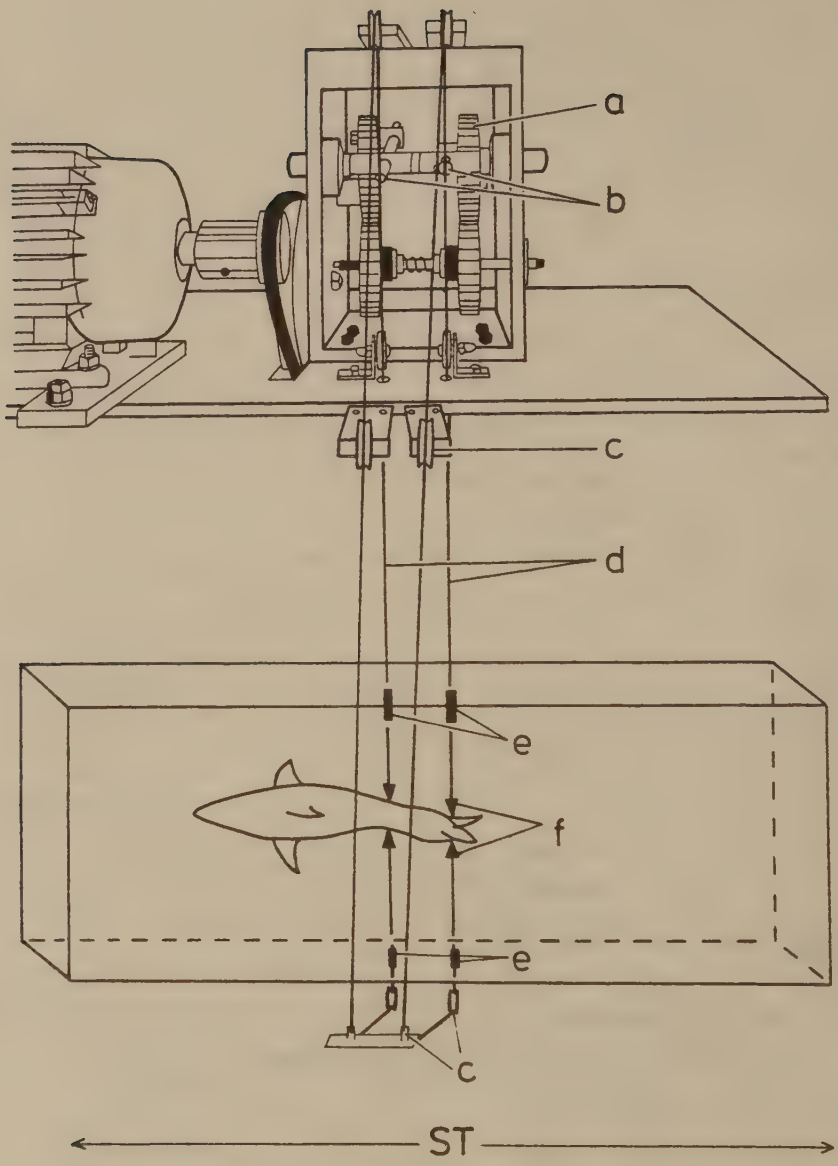


Abb. 21 Apparatur zum Bewegen des Modells (Bewegungsmodul),
a: Zahnräder, b: exzentrisch gelagerte Gestänge, c: Umlenkrollen,
d: Dacronschnüre, e: Stahlwellen, f: Krafteinleitungspunkte,
ST: Meßstrecke

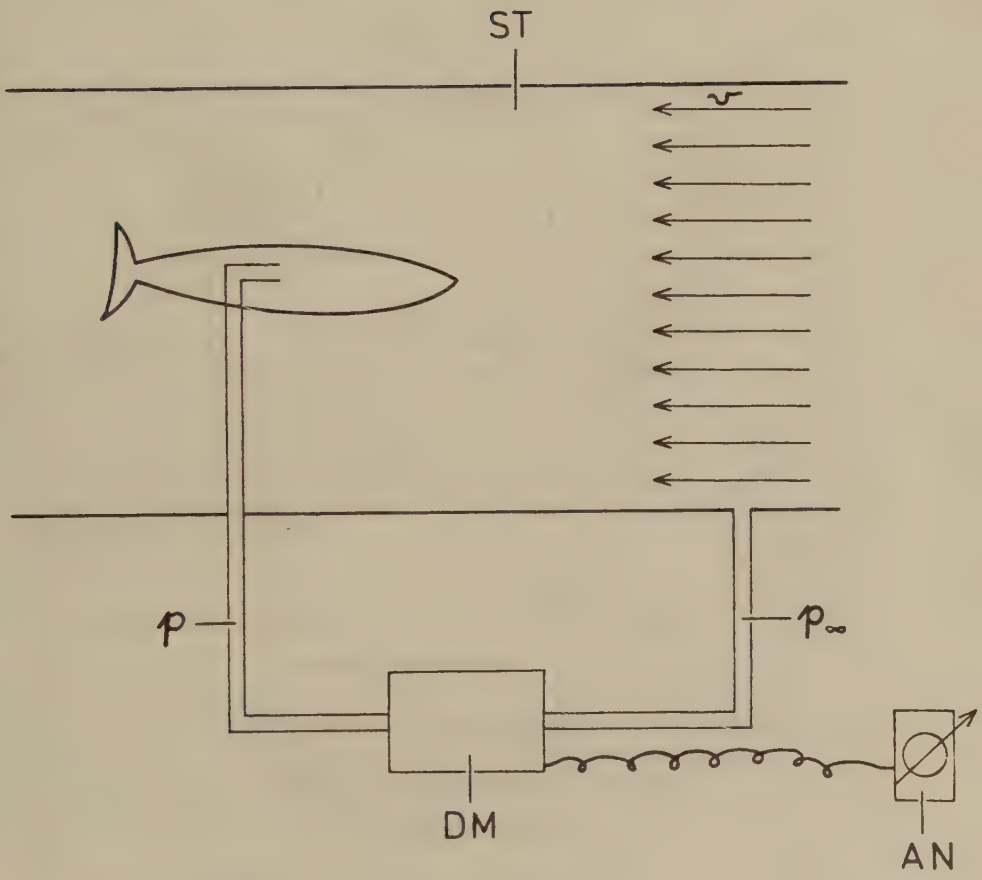


Abb. 22 Übersichtsskizze der Druckmeßvorrichtung,
p: hydrodynamischer Druck, p∞ : Umgebungsdruck,
DM: Druckmeßdose, AN: Anzeigengerät, ST: Meßstrecke,
v_0 : Strömungsgeschwindigkeit

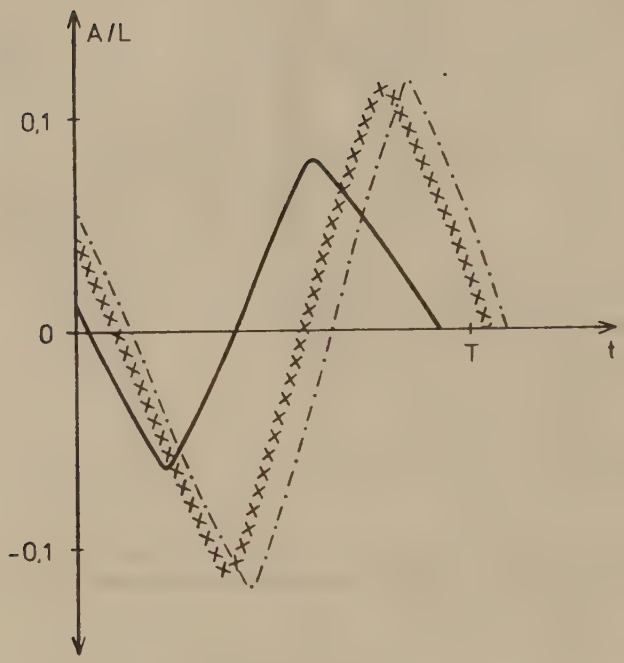


Abb. 23 Weg-Zeit-Kurve des beweglichen Haifischmodells im körperbezogenem System

——— Körperpunkt: x/L = 0,71

xxxxx Flukenbasis: x/L = 0,89

—·—·— Flukenspitze

t: Zeit, A/L: relative Amplitude = 0,22

T: Periodendauer = 0,48 s

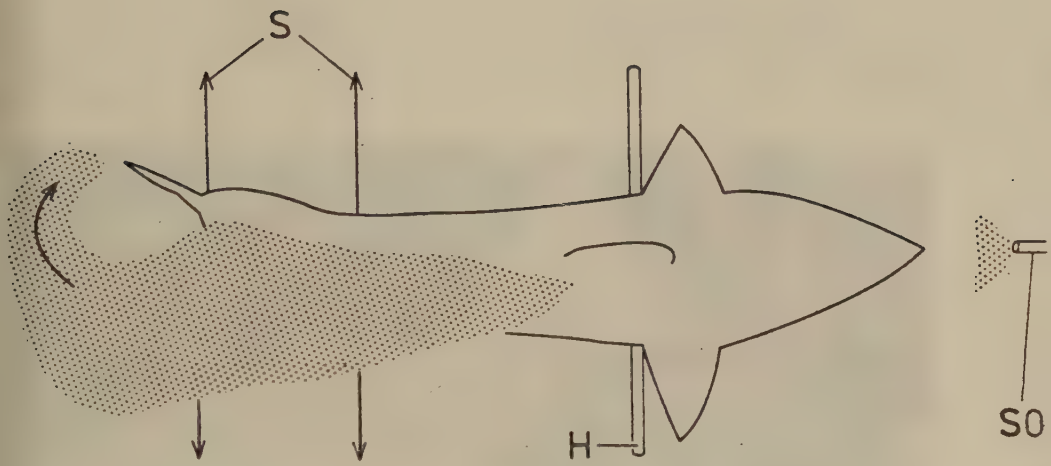


Abb. 24 Strömungsverlauf beim beweglichen Haifischmodell, Fluke hat soeben linken Umlenkpunkt verlassen, gepunktet: Kontrastmittel, SO: Sonde, H: Halterungsrohr, S: Schnüre

Abb. 25a Stömungsverlauf im körpernahen Bereich entlang eines gestreckten, starren Haifischkörpers,
$v_0 = 2\ ms^{-1}$

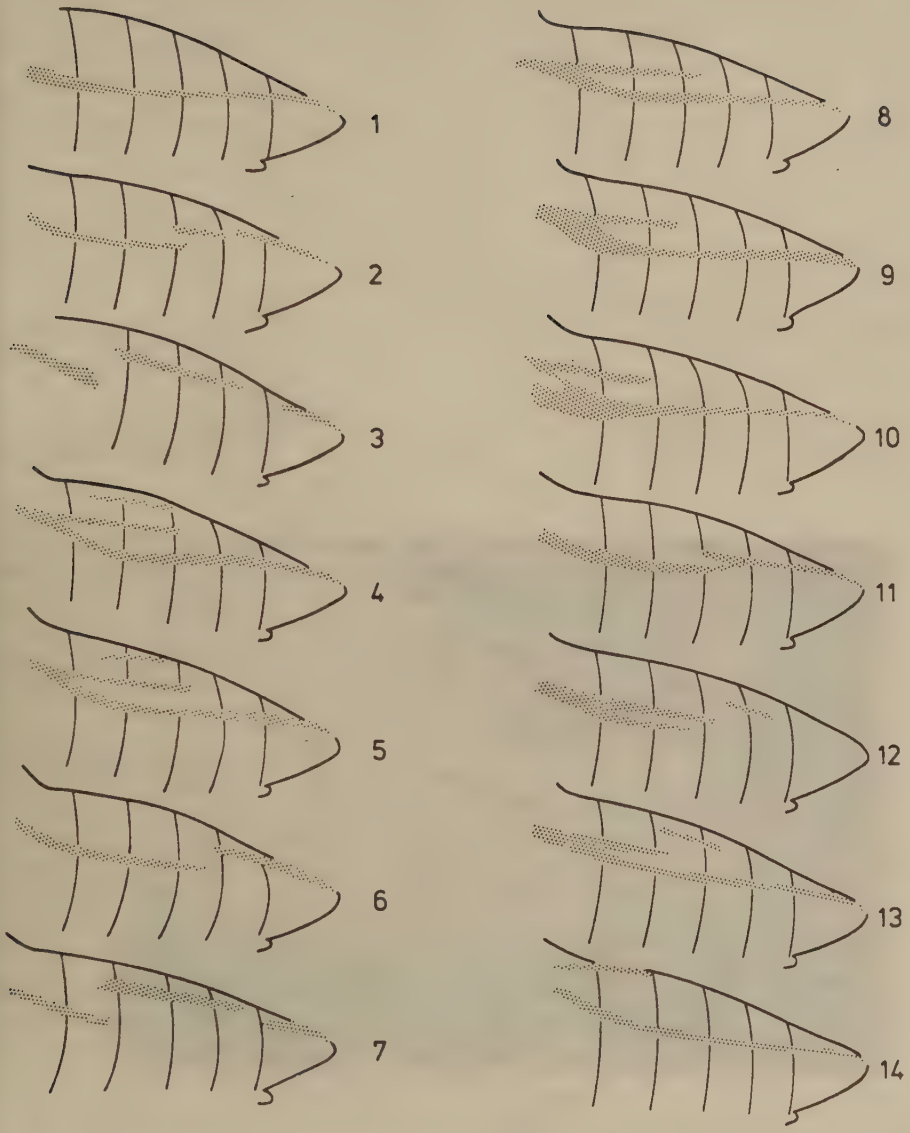


Abb. 25b Verhalten eines Farbfadens, am Rostrum auftretend, in der körpernahen Strömung entlang eines Haifischmodells bei scombridiformer Bewegung, 2 volle Zyklen umfassend (1 - 14), In den Phasen 1 und 8 befindet sich der Schwanzstiel im rechten Umlenkbereich,

$v_0 = 2\ ms^{-1}$, $\omega = 3{,}4$ Hz

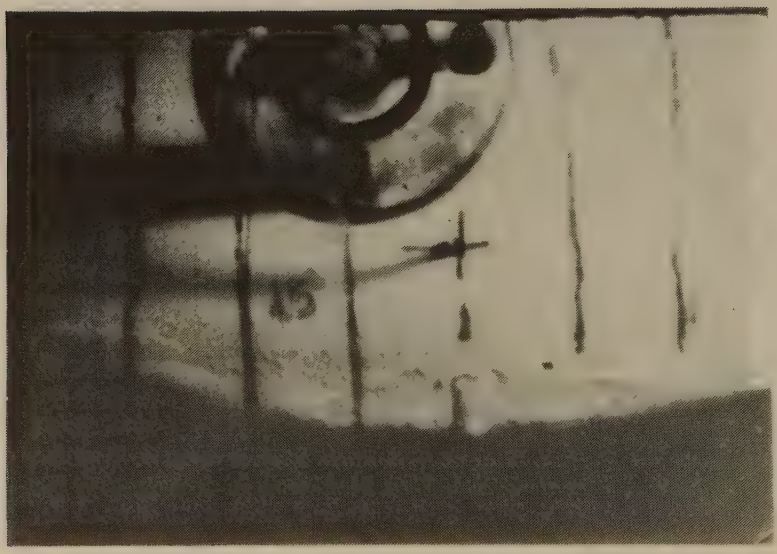


Abb. 26a Strömungsverlauf im körpernahen Bereich entlang eines starren, gestrecken Haifischmodells, bei seitlichem Austritt der Farbe, $v_0 = 2\ ms^{-1}$

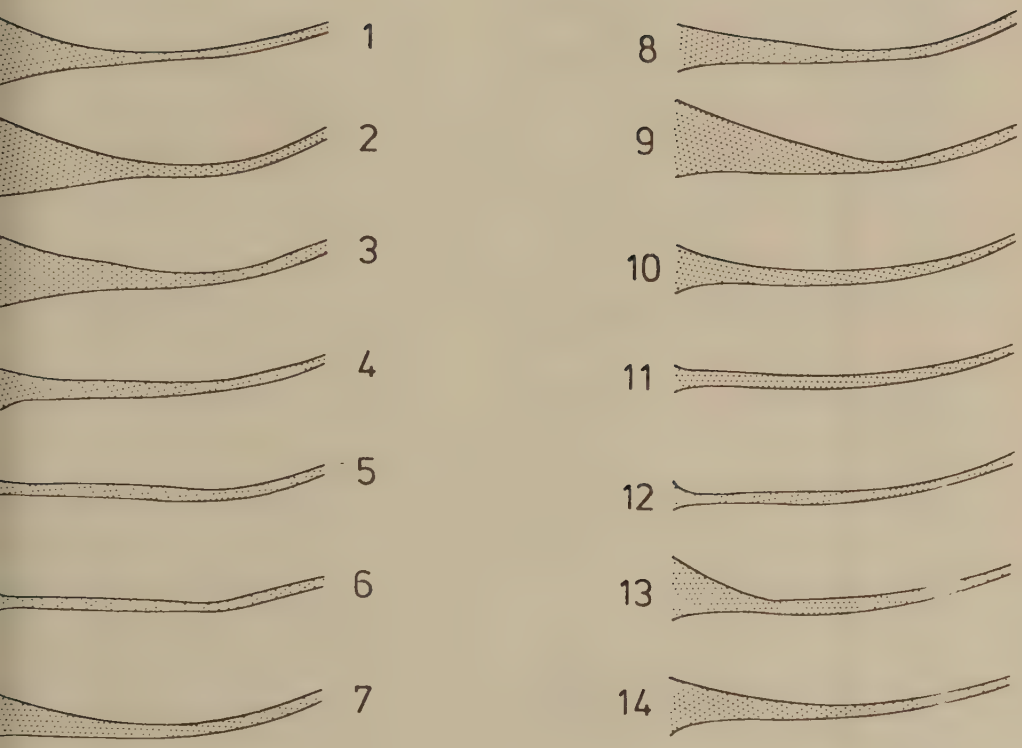


Abb. 26b Verhalten eines Farbfadens, seitlich auftretend, in der körpernahen Strömung entlang eines Haifischmodells bei scombridiformer Bewegung, 2 volle Zyklen umfassend (1 - 14), in den Phasen 1 und 8 befindet sich der Schwanzstiel im linken Umlenkbereich,

$v_0 = 2\ ms^{-1}$, $\omega = 3{,}4\ Hz$

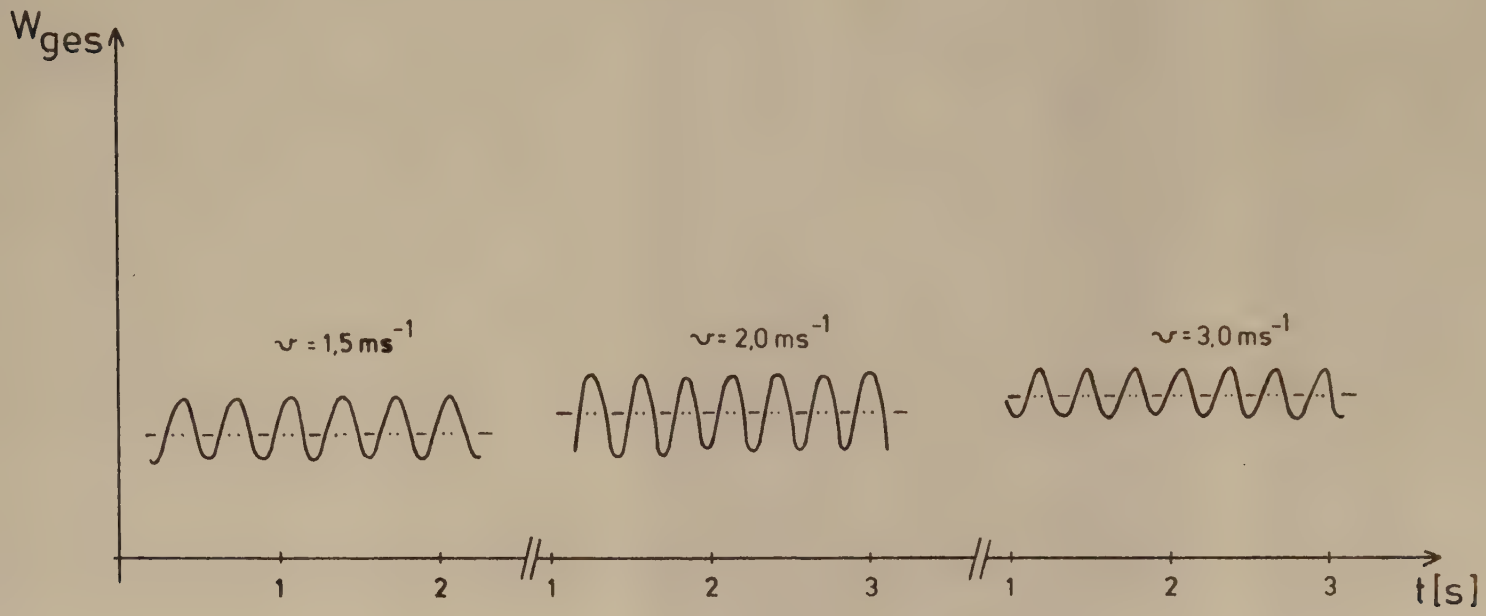
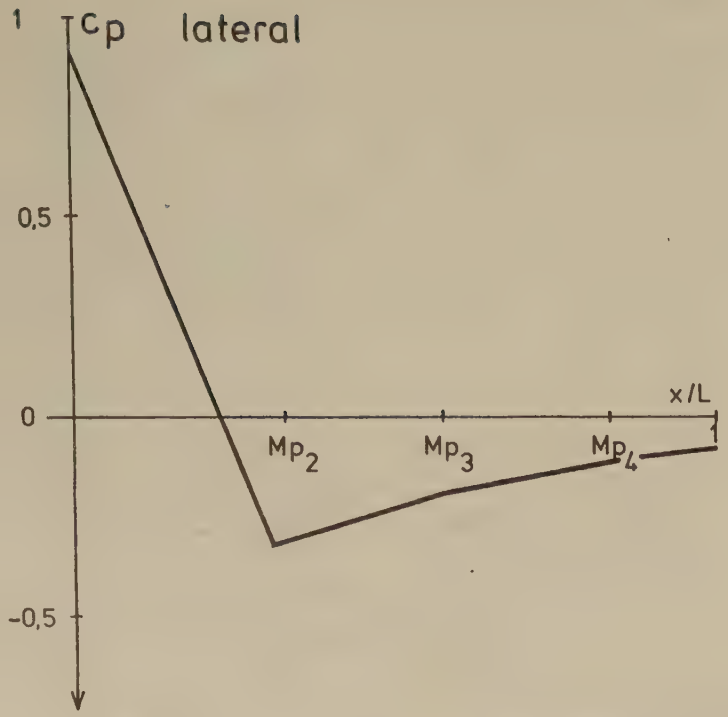


Abb. 27 Signale aus der Meßreihe zum Gesamtwiderstand bei 3 verschiedenen Geschwindigkeiten und scombridiformer Bewegung

W_{ges}: Gesamtwiderstand, t: Zeit, v_0: Geschwindigkeit



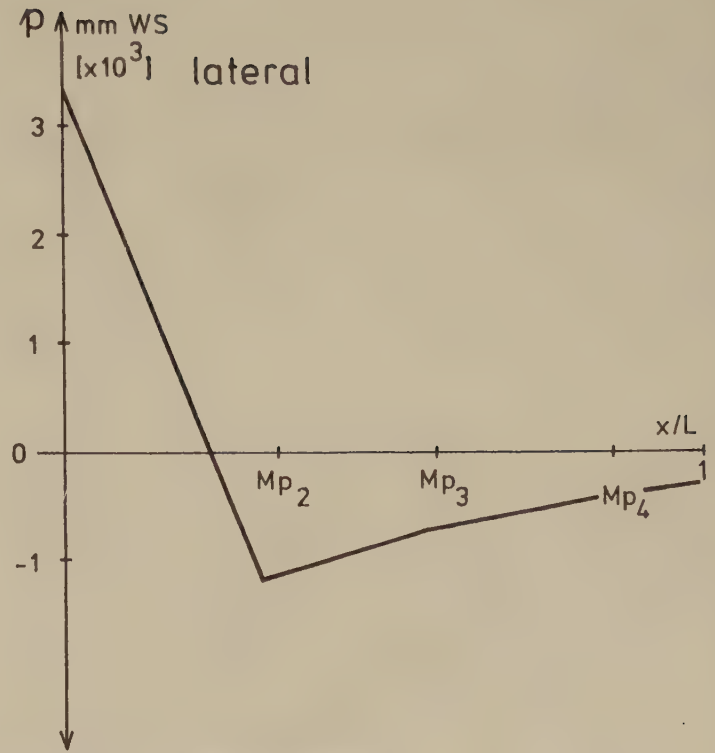
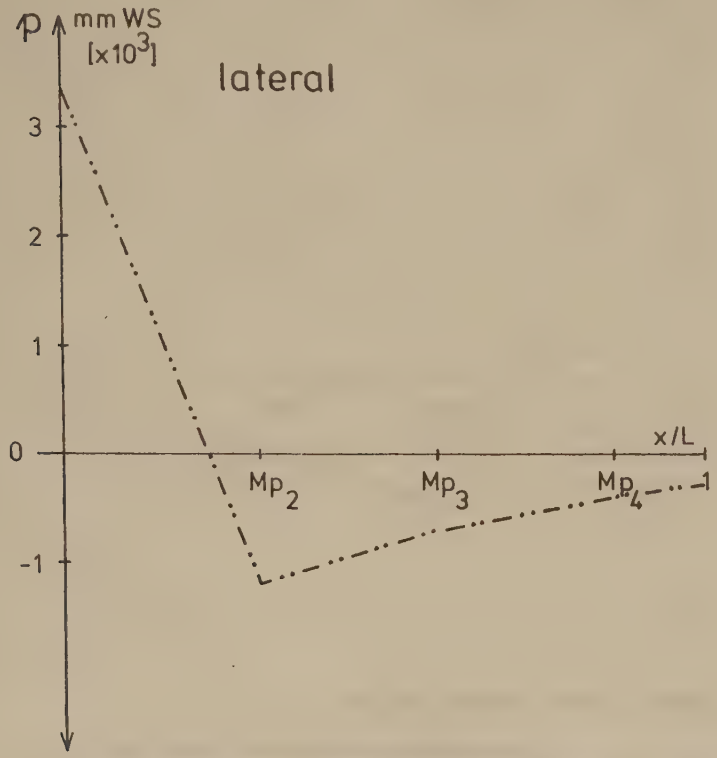


Abb. 28 Heringshai, starrer, gestreckter Körper, laterale Meßreihe

Verteilung des Druckbeiwertes c_p in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L, dimensionslos

Verteilung des hydrodynamischen Druckes in Abhängigkeit von der Körperlänge x/L, Druck gemessen in mm WS



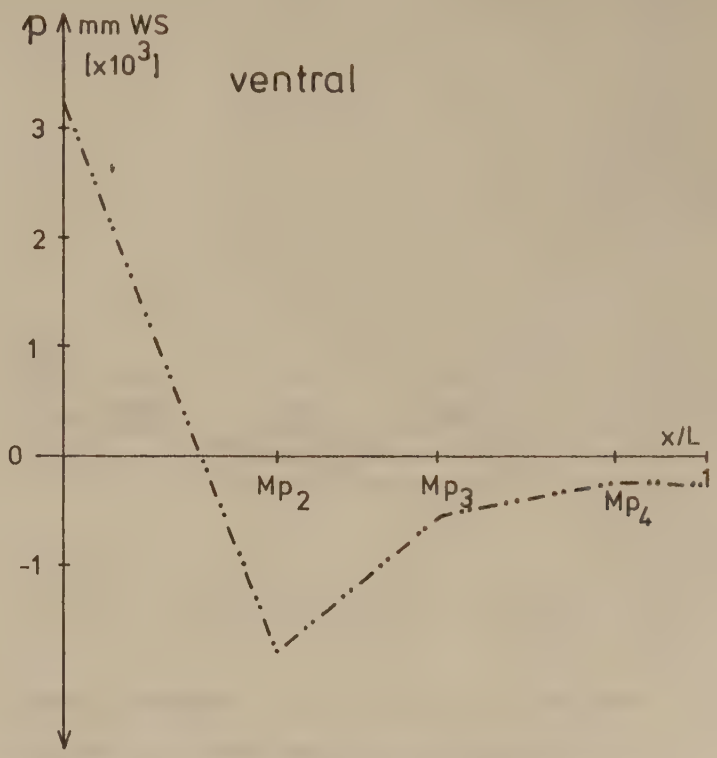


Abb. 29 Heringshai, starrer, gestreckter Körper, Verteilung des Druckbeiwertes c_p über der relativen Körperlänge x/L

laterale Meßreihe

ventrale Meßreihe

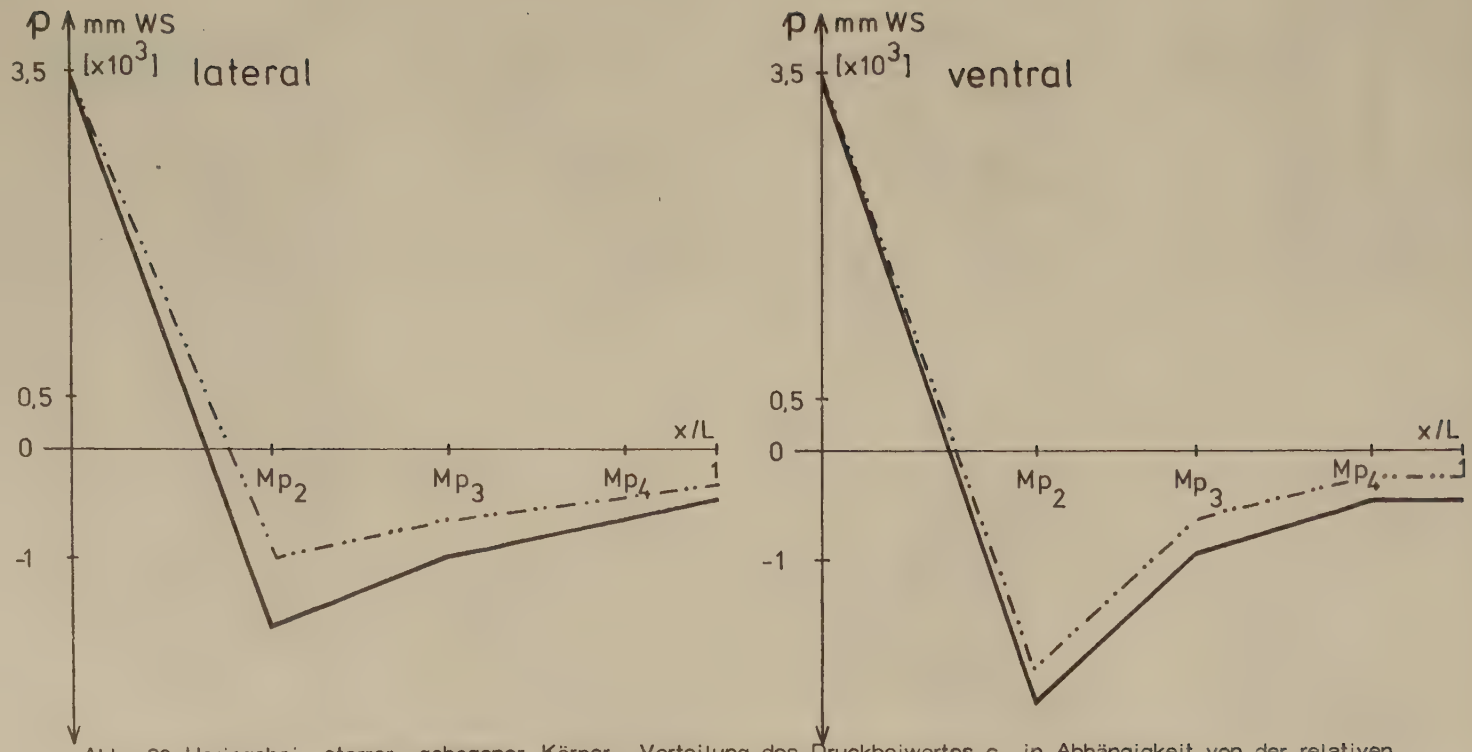


Abb. 30 Heringshai, starrer, gebogener Körper, Verteilung des Druckbeiwertes c_p in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L

laterale Meßreihe
——— Schwanzstiel nach links ausgelenkt, —·—·—·— Schwanzstiel nach rechts ausgelenkt
ventrale Meßreihe

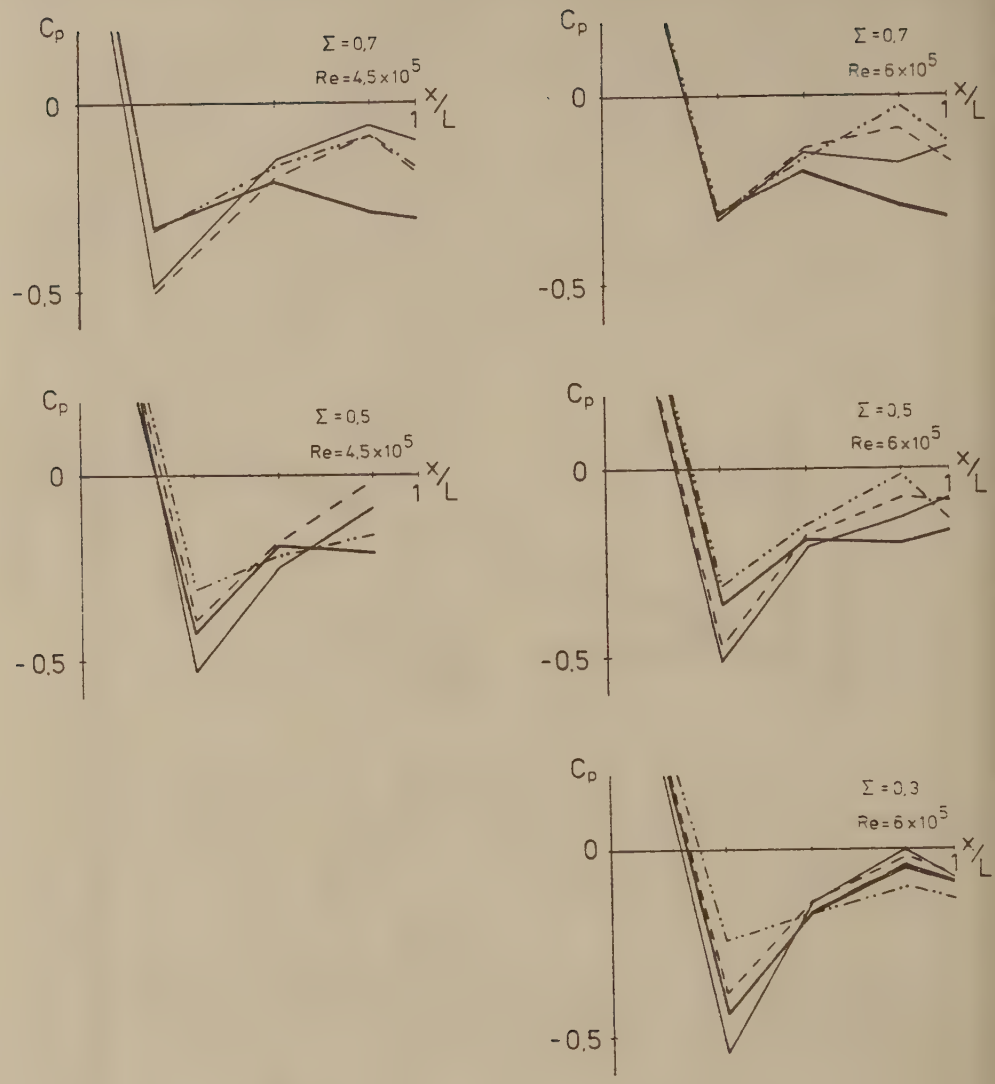
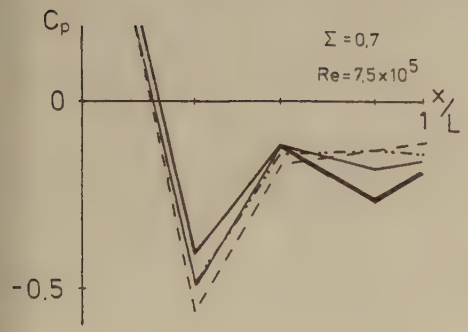
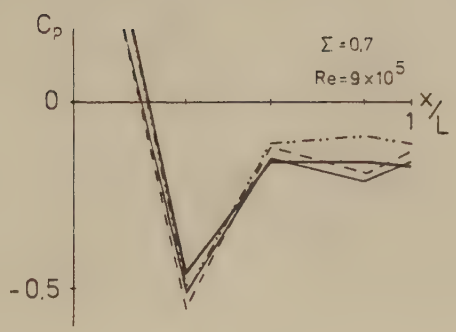


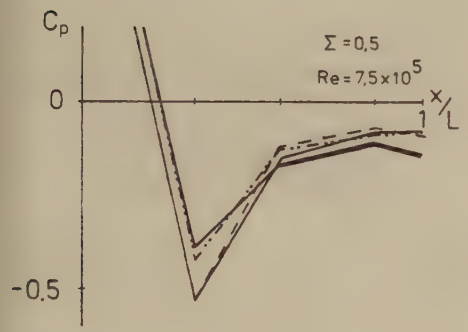
Abb. 31 Heringshai, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L, scombridiforme Bewegung, c.+r. K.

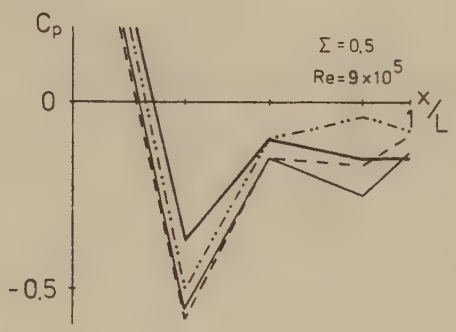
Σ : reduzierte Frequenz, Re: Reynolds-Zahl

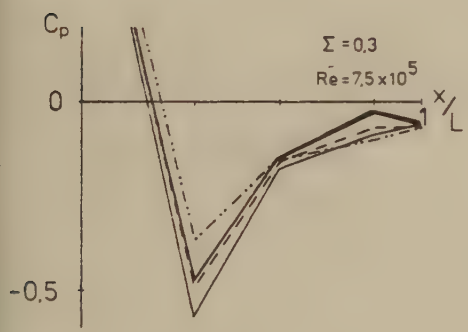
——— : t_1 ——— : t_2 —·—·— : t_3 — — — : t_4

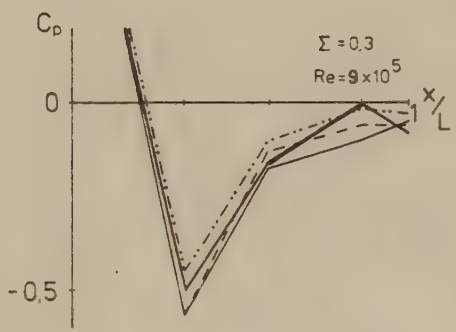

C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L

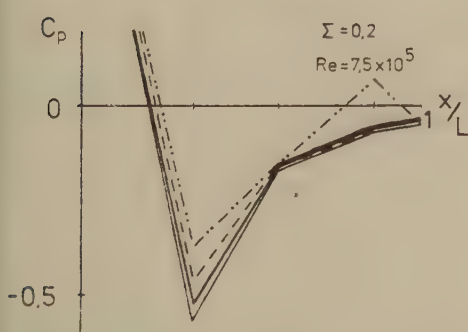

C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L

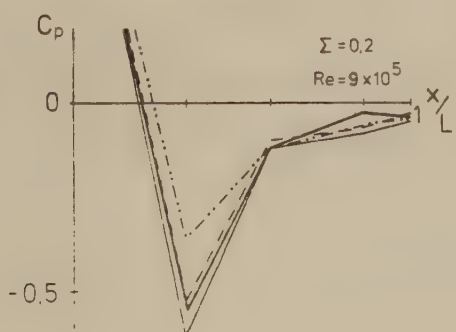

C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L

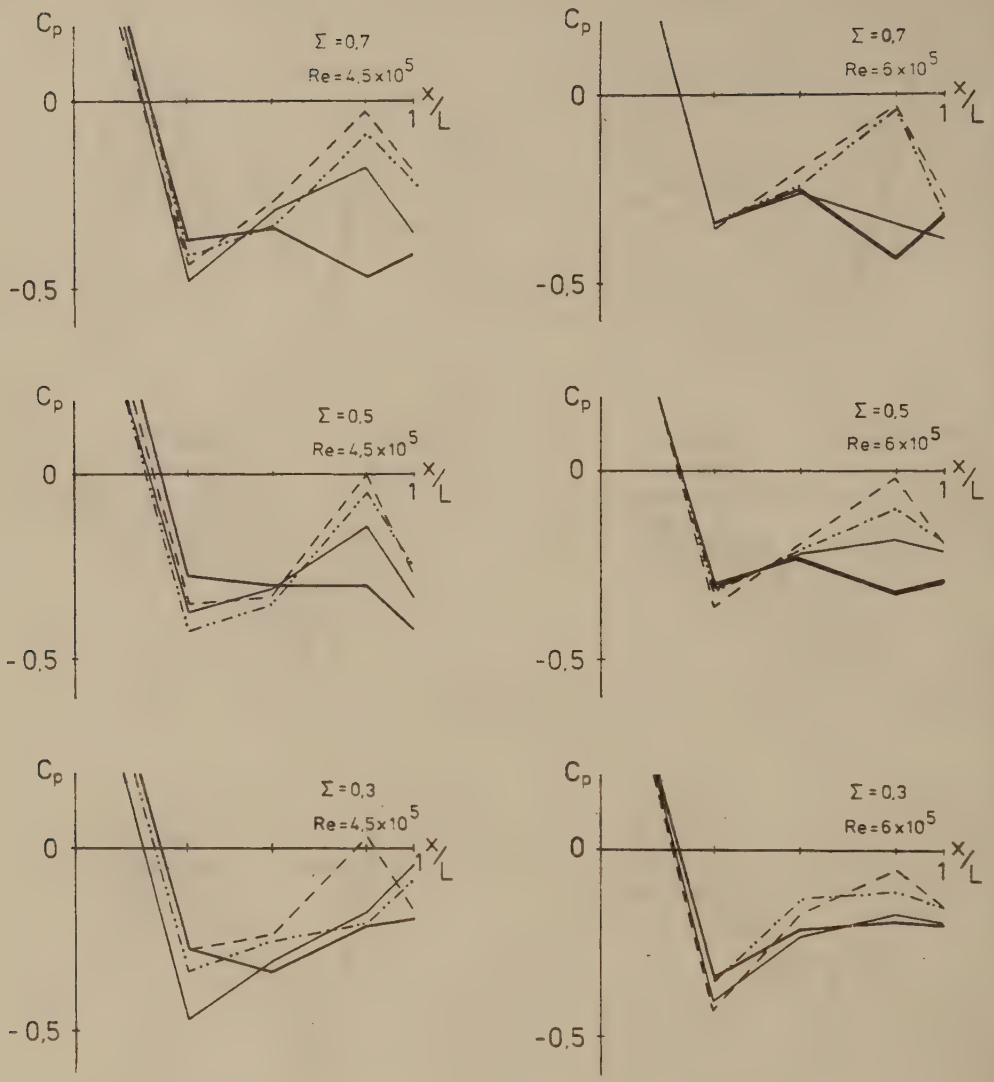
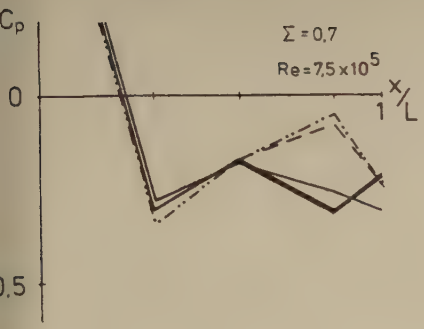
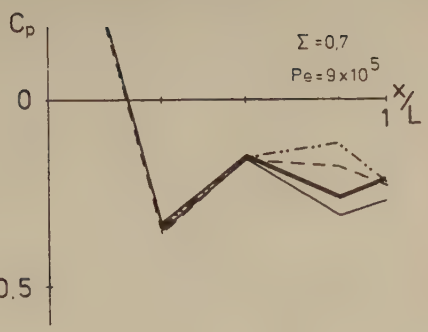


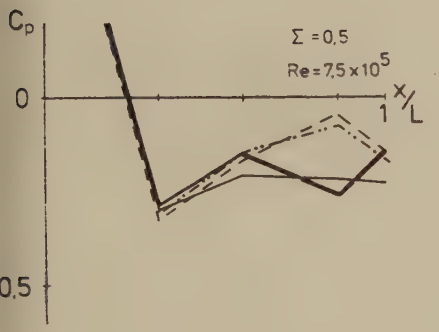
Abb. 32 Heringshai, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L, einfache Schwingung, c!K

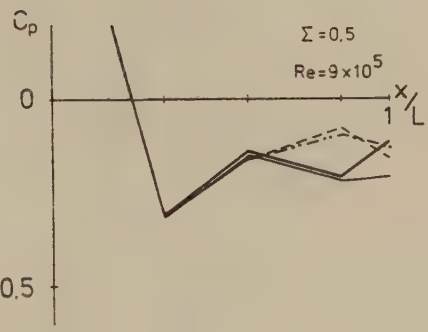
Σ: reduzierte Frquenz, Re: Reynolds-Zahl

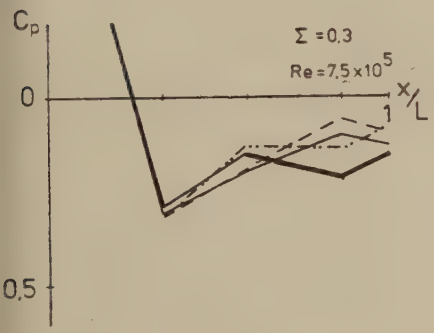
———— : t_1 ———— : t_2 —·—·— : t_3 – – – – : t_4

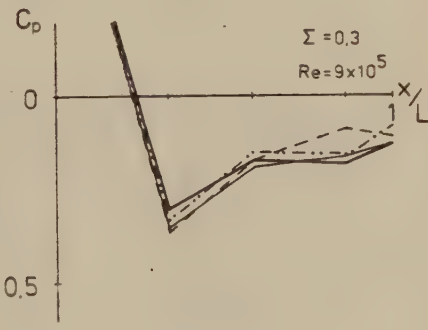

C_p
$\Sigma = 0,7$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
1
x/L
0,5

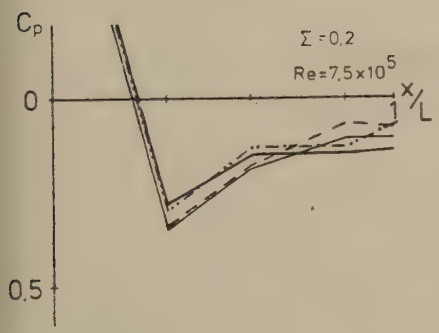

C_p
$\Sigma = 0,7$
$Pe = 9 \times 10^5$
0
1
x/L
-0.5

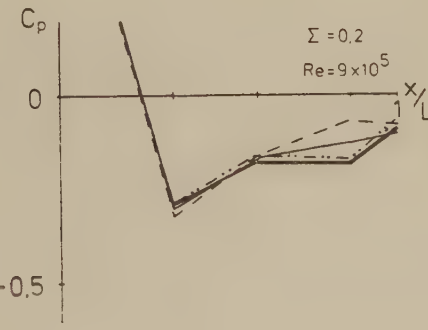

C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
1
x/L
0,5


C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 9 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5


C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
1
x/L
0,5


C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 9 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5


C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
1
x/L
0,5


C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 9 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

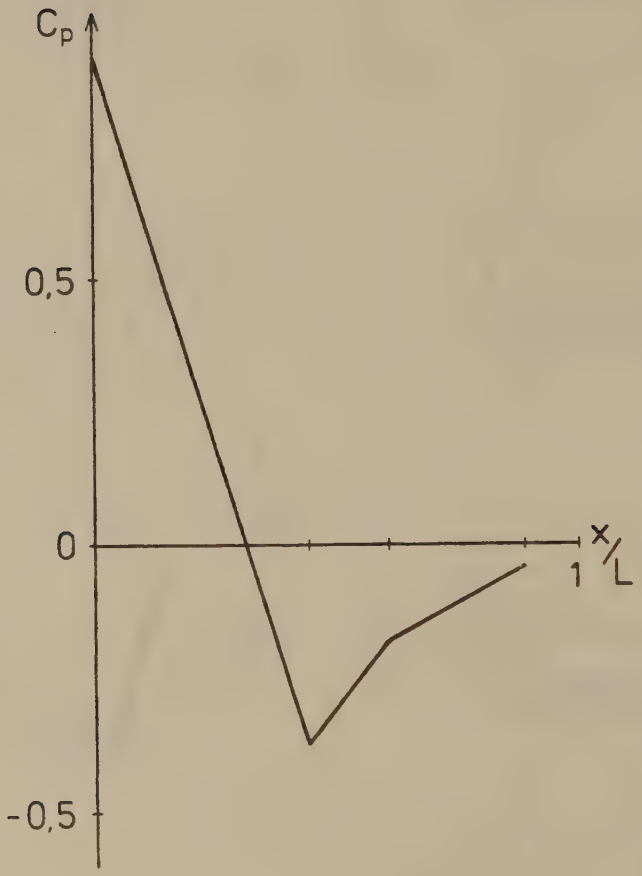
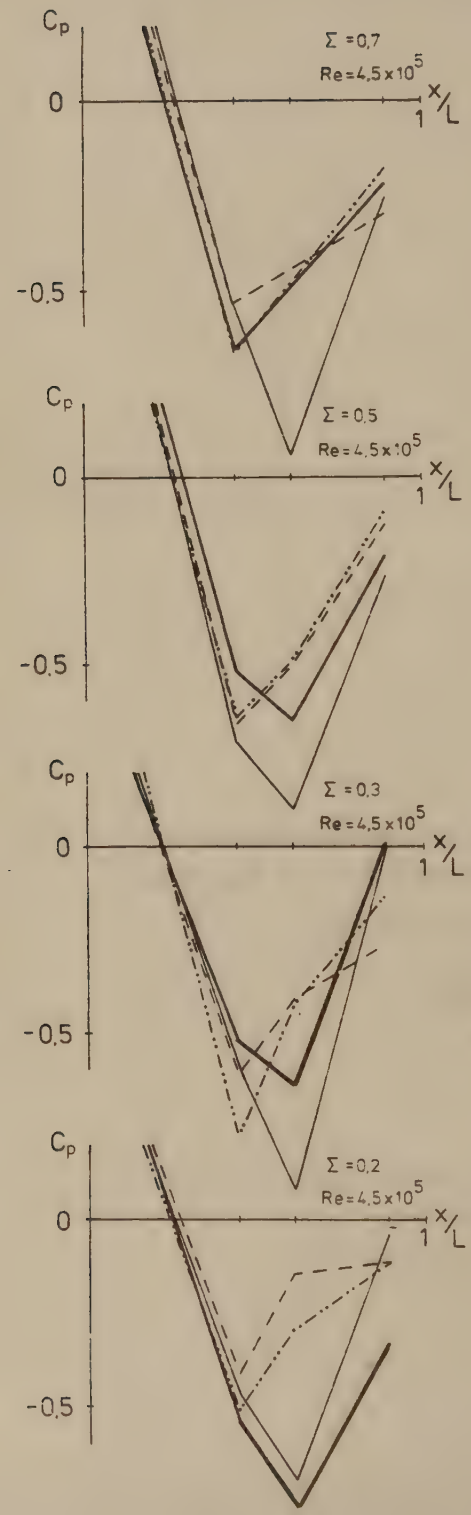


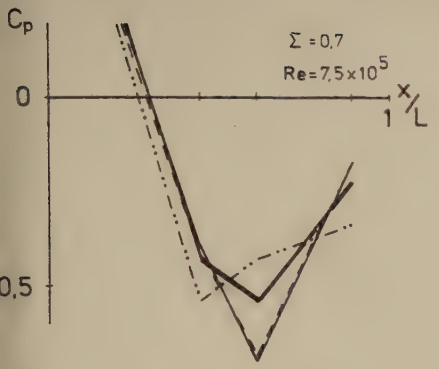
Abb. 33 Makrele, starrer, gestreckter Körper, Verteilung des Druckbeiwertes c_p über der relativen Körperlänge x/L, ventrale Meßreihe

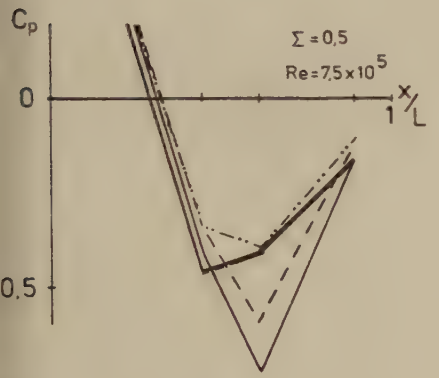
Abb. 34 Makrele, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode (t_i) in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L,
scombridiforme Bewegung (c.+r.K.)
Σ : reduzierte Frequenz
Re : Reynolds-Zahl

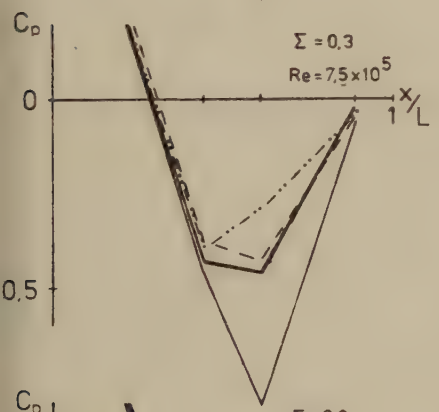
———: t_1, ——— : t_2, — ·· — ·· —: t_3, – – – –: t_4

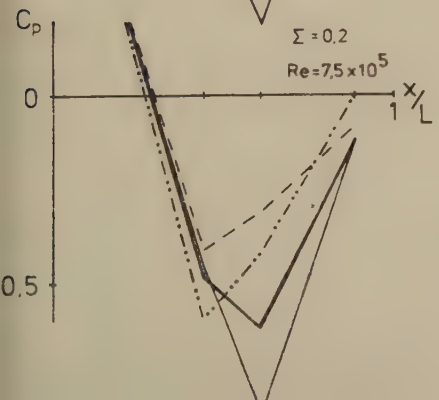
b.w.

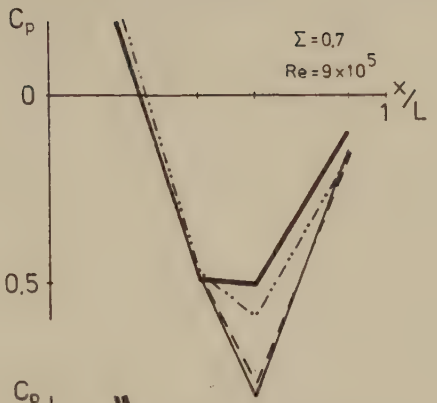

C_p
0
-0,5
1
x/L
Σ =0,7
Re=4,5x10^5
Σ =0,5
Re=4,5x10^5
Σ =0,3
Re=4,5x10^5
Σ =0,2
Re=4,5x10^5
Σ =0,5
Re=6x10^5
Σ =0,3
Re=6x10^5
Σ =0,2
Re=6x10^5

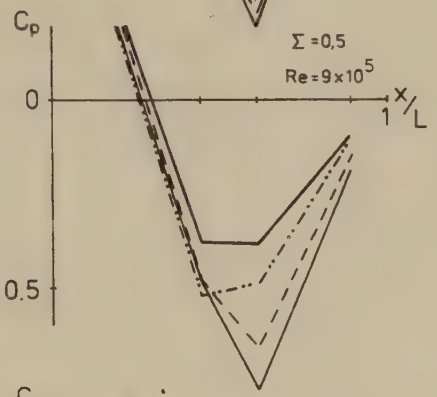

C_p
$\Sigma = 0,7$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
0,5
1
x/L

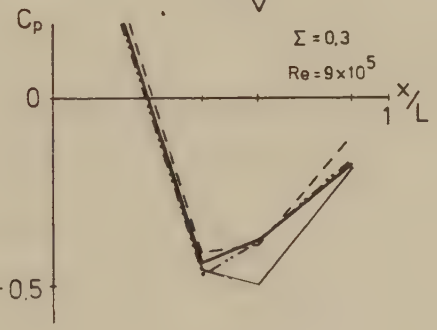

C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
0,5
1
x/L


C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
0,5
1
x/L


C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 7,5 \times 10^5$
0
0,5
1
x/L


C_p
$\Sigma = 0,7$
$Re = 9 \times 10^5$
0
-0,5
1
x/L


C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 9 \times 10^5$
0
-0,5
1
x/L


C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 9 \times 10^5$
0
-0,5
1
x/L

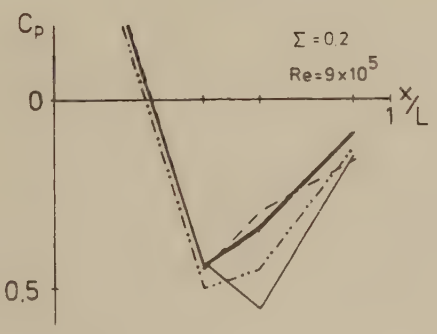

C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 9 \times 10^5$
0
-0,5
1
x/L

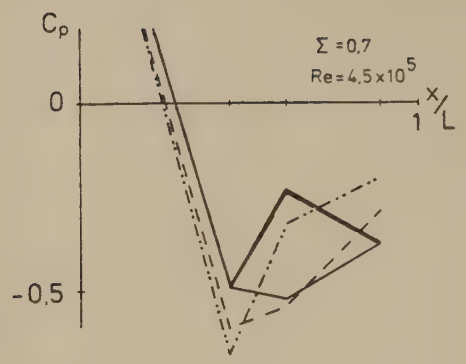
Abb. 35 Makrele, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode (t_i) in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L,
einfach Schwingung (c.!K.)

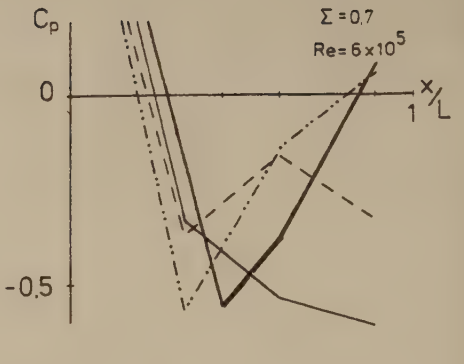
Σ : reduzierte Frequenz

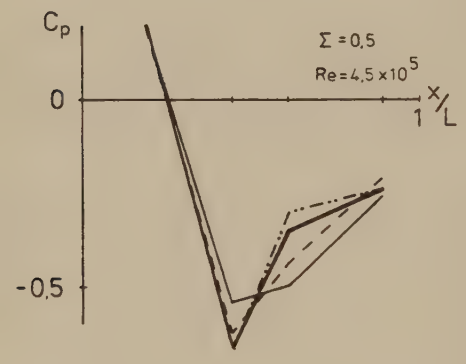
Re : Reynolds-Zahl

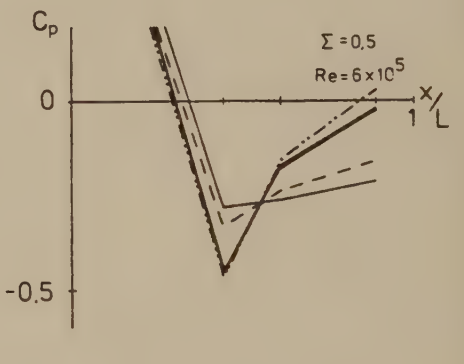
——: t_1, ——: t_2, —·—·—: t_3, – – – –: t_4

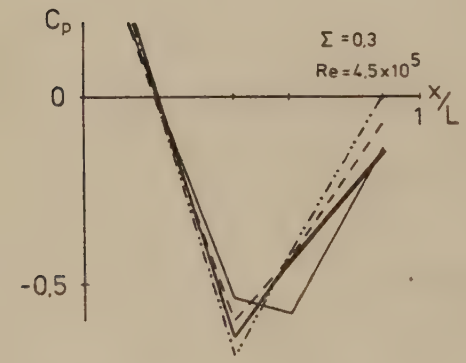
b.w.

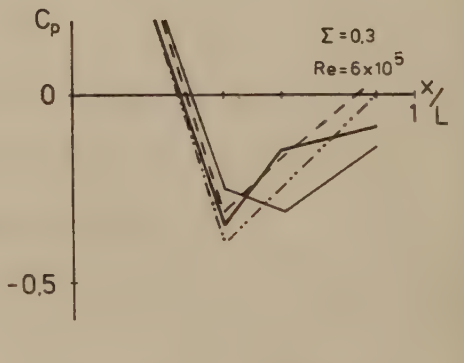

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 4,5 \times 10^5$
1
x/L

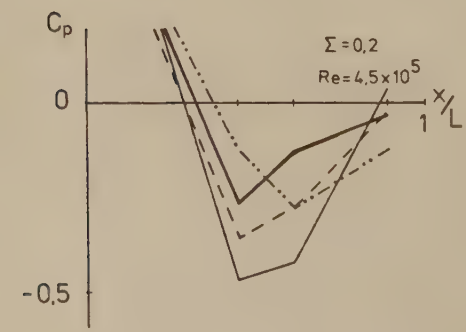

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 6 \times 10^5$
1
x/L

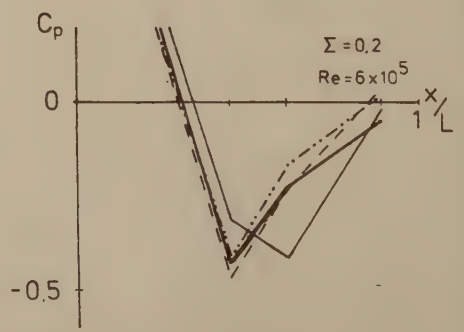

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 4,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 6 \times 10^5$
1
x/L

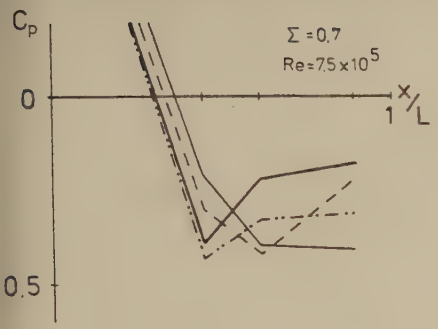

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 4,5 \times 10^5$
1
x/L

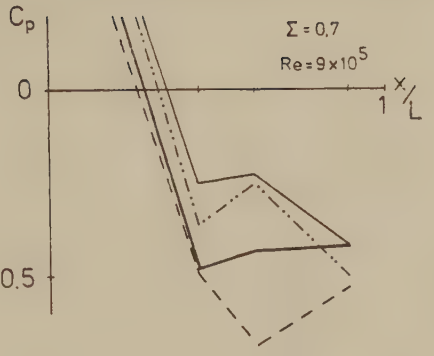

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 6 \times 10^5$
1
x/L

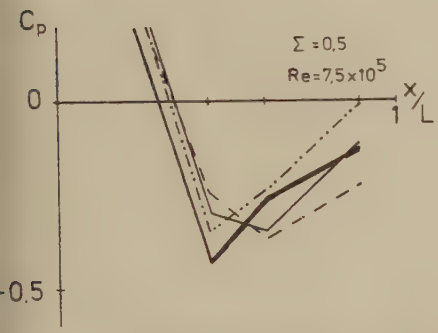

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 4,5 \times 10^5$
1
x/L

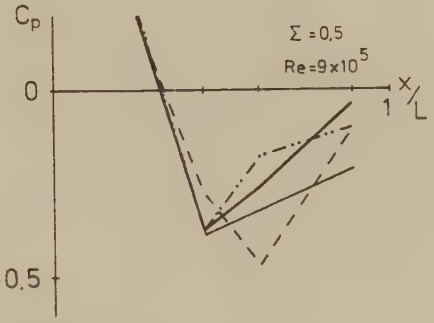

C_p
0
-0,5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 6 \times 10^5$
1
x/L

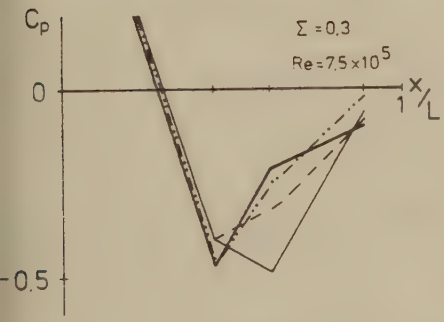
c!K MAKREL

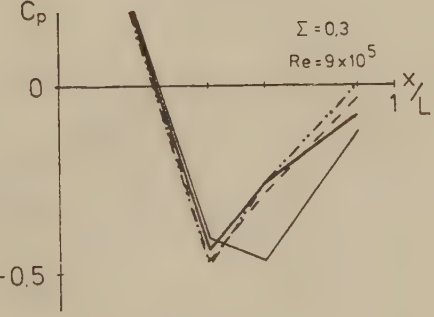

C_p
0
0.5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L

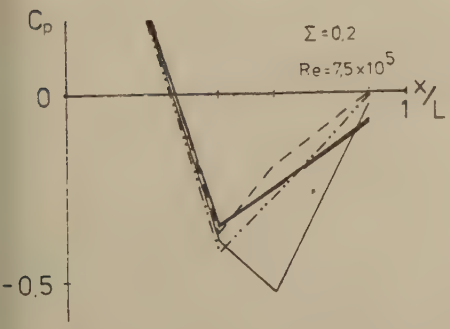

C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,7$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L

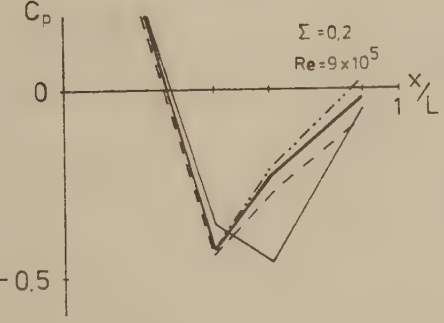

C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,5$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,3$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 7,5 \times 10^5$
1
x/L


C_p
0
-0.5
$\Sigma = 0,2$
$Re = 9 \times 10^5$
1
x/L

CIK MAKRELE

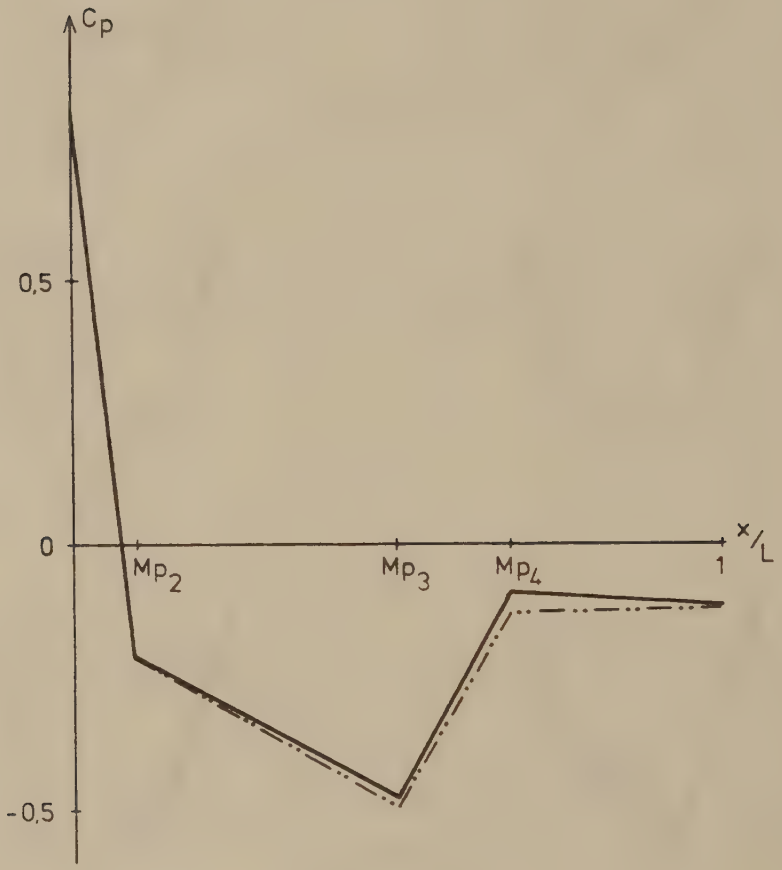


Abb. 36 Delphin, starrer, gebogener Körper, Verteilung des Druckbeiwertes c_p in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge

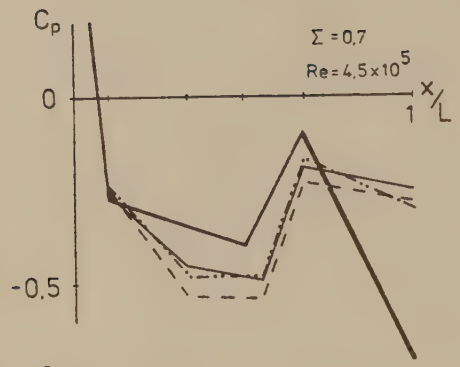
——— Schwanzstiel nach dorsal gebogen

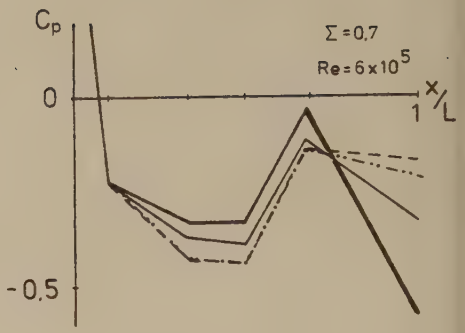
—·—·— Schwanzstiel nach ventral gebogen

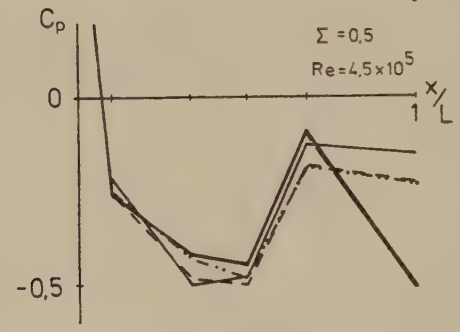
Abb. 37 Delphin, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode (t_i) in Abhängigkeit von der relativen Körperlänge x/L,
einfache Schwingung (c!K)
Σ : reduzierte Frequenz
Re : Reynolds-Zahl

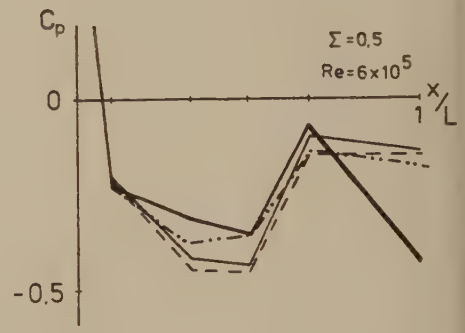
———: t_1, ———: t_2, —·—·—: t_3, – – – –: t_4

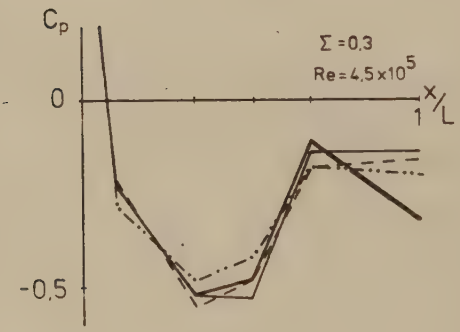
b.w.

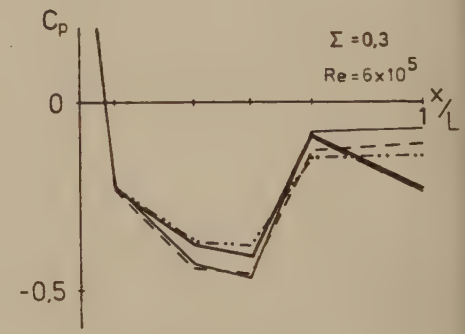

C_p
$\Sigma = 0,7$
$Re = 4,5 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

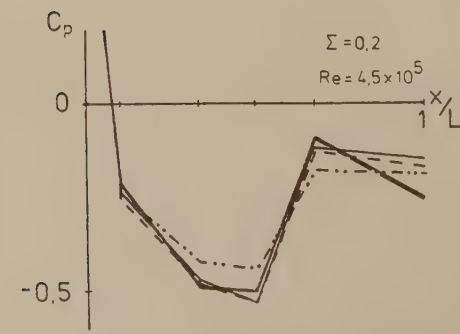

C_p
$\Sigma = 0,7$
$Re = 6 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

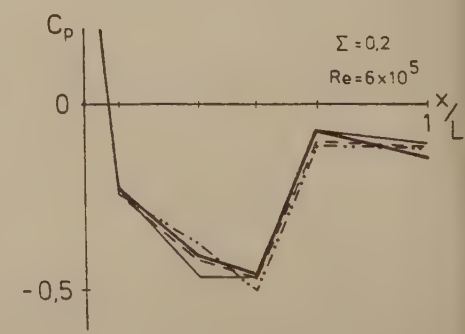

C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 4,5 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5


C_p
$\Sigma = 0,5$
$Re = 6 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

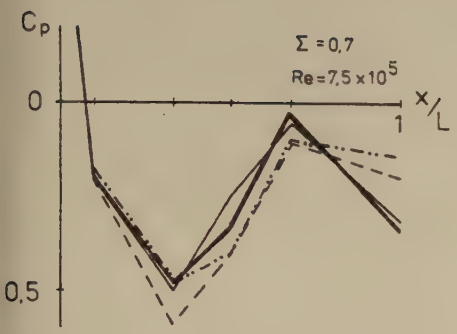

C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 4,5 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

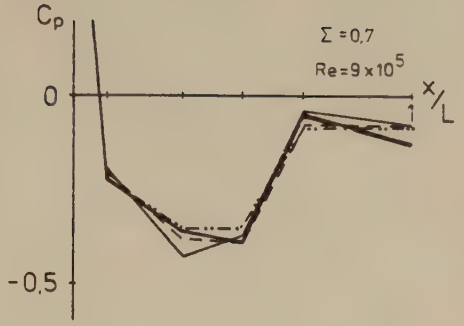

C_p
$\Sigma = 0,3$
$Re = 6 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

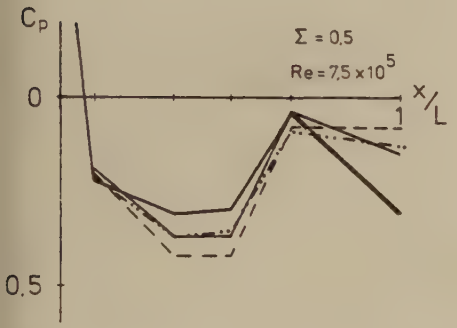

C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 4,5 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

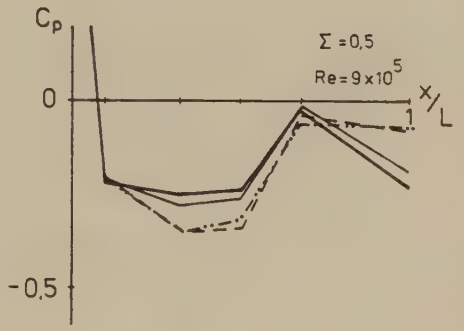

C_p
$\Sigma = 0,2$
$Re = 6 \times 10^5$
0
1
x/L
-0,5

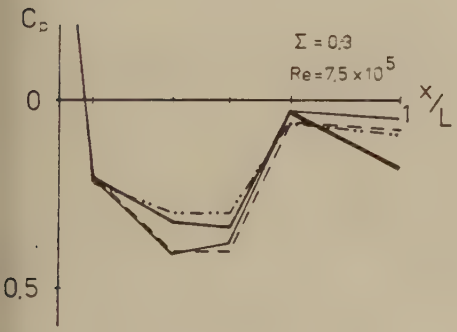
c!K DELPH

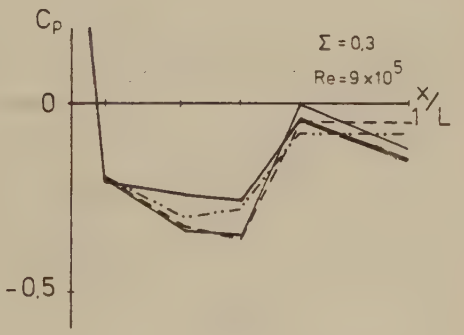

Cp
Σ = 0,7
Re = 7,5 x 10^5
0
x/L
1
0,5

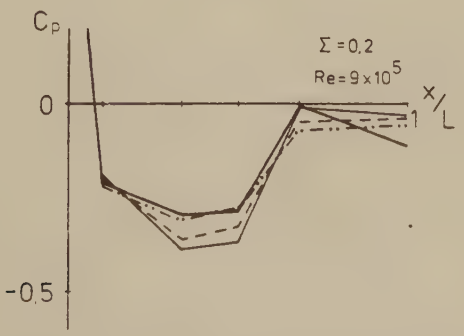

Cp
Σ = 0,7
Re = 9 x 10^5
0
x/L
1
-0,5


Cp
Σ = 0,5
Re = 7,5 x 10^5
0
x/L
1
0,5


Cp
Σ = 0,5
Re = 9 x 10^5
0
x/L
1
-0,5


Cp
Σ = 0,3
Re = 7,5 x 10^5
0
x/L
1
0,5

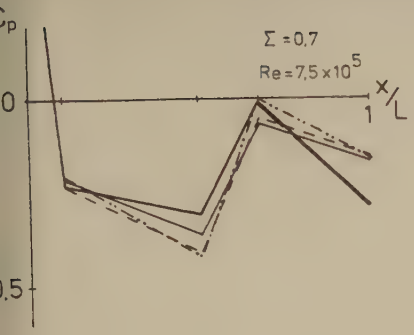

Cp
Σ = 0,3
Re = 9 x 10^5
0
x/L
1
-0,5

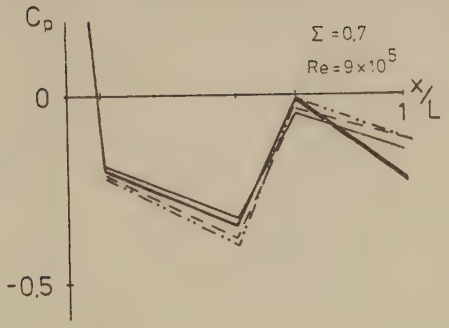

Cp
Σ = 0,2
Re = 9 x 10^5
0
x/L
1
-0,5

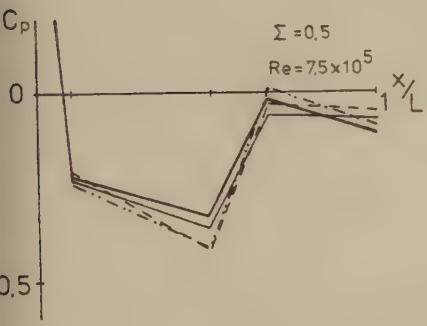
C!K DELPHIN

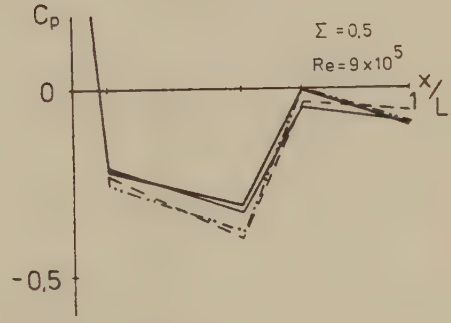
Abb. 38 Delphin, intrazyklische Verteilung des Druckbeiwertes c_p zu 4 Zeitpunkten der Periode in Abhängigkeit der relativen Körperlänge x/L,
scombridiforme Bewegung (c.+r.K.)
Σ : reduzierte Frequenz
Re : Reynolds-Zahl

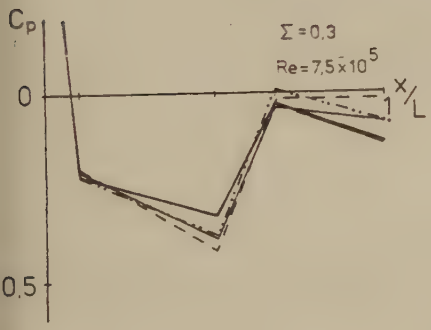
——— : t_1, ——— : t_2, —·—·—: t_3, – – – –: t_4

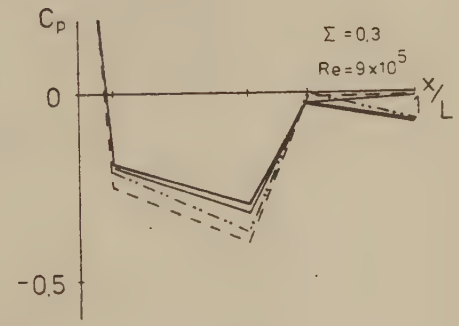

Σ = 0,7
Re = 7,5 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1

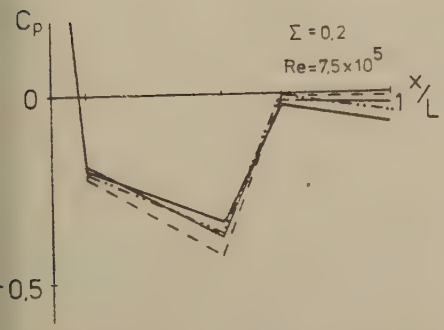

Σ = 0,7
Re = 9 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1

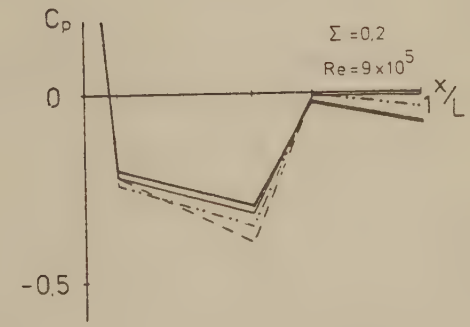

Σ = 0,5
Re = 7,5 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1


Σ = 0,5
Re = 9 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1


Σ = 0,3
Re = 7,5 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1


Σ = 0,3
Re = 9 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1


Σ = 0,2
Re = 7,5 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1


Σ = 0,2
Re = 9 x 10^5
Cp
0
-0,5
x/L
1

c.+r.K Delphin

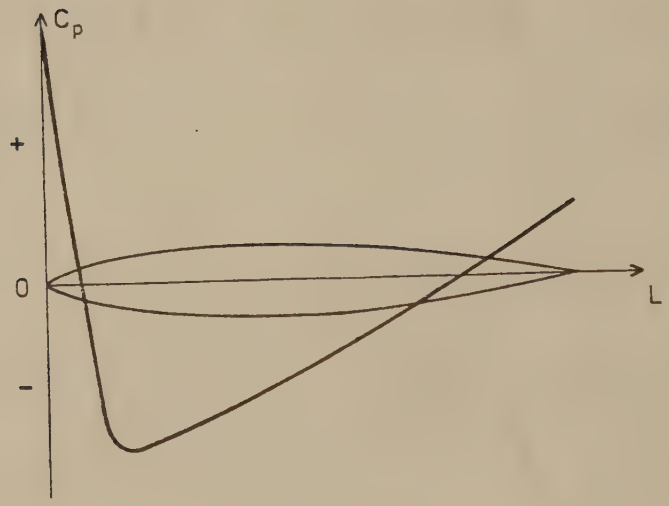


Abb. 39 Verteilung des Druckbeiwertes entlang eines Flugzeugrumpfes,
c_p: Druckbeiwert, L: Körperlänge

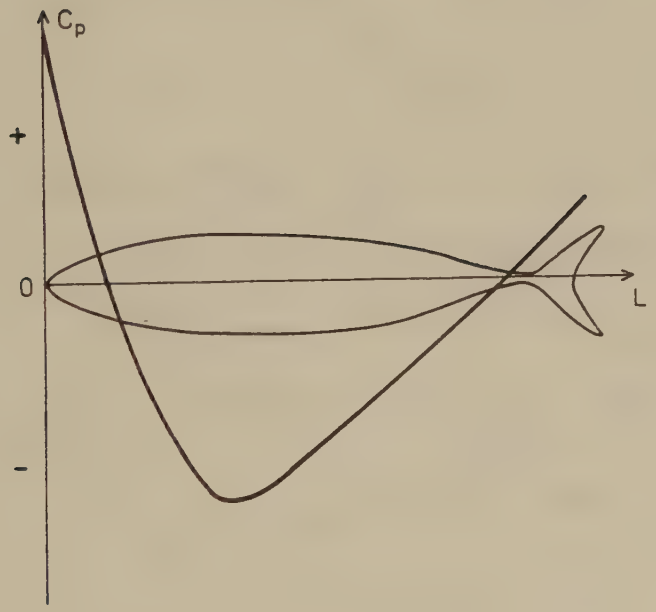


Abb. 40 Verteilung des Druckbeiwertes entlang der Körperform eines schnell schwimmenden Wirbeltieres, c_p: Druckbeiwert, L: Körperlänge

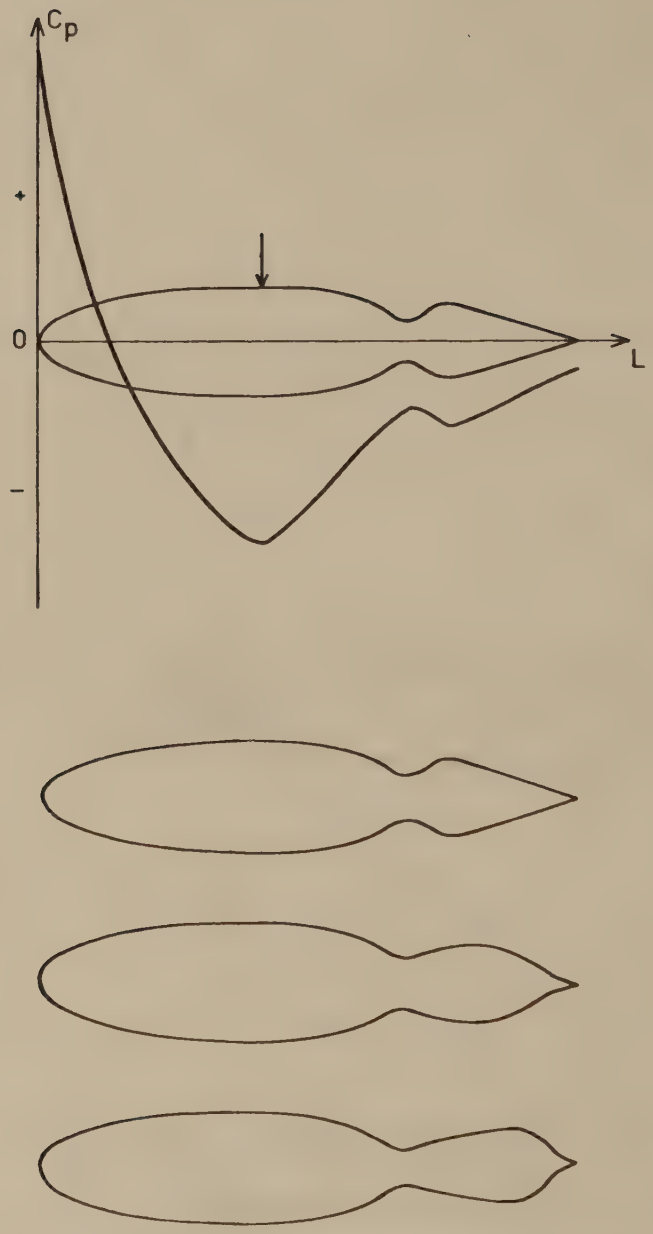


Abb. 41 a) Druckverteilung entlang eines hypothetischen Körperprofils, statisch, ein Zwischenmaximum aufweisend

b) Dynamisierte hypothetische Körperform, verschiedene Phasen während einer Periode zeigend, bei welchem ein Zwischenmaximum caudad wandert

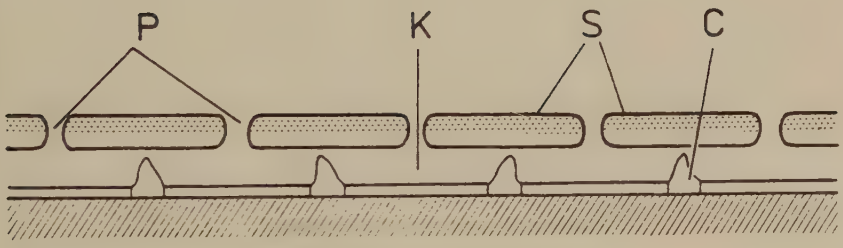


Abb. 42 Schematische Darstellung des Seitenlinienorgans der Fische, S: Schuppen, P: Poren, K: Kanal, C: Sinneshügel

Lebenslauf

Name	:	Bodo Ungerechts
Geb.	:	13. Januar 1948 Rheine
Eltern	:	Ewald Ungerechts, Polier Ilse Ungerechts, geb. Zander, Hausfrau
Ehefrau	:	Karin Ungerechts, geb. Funk
Schule	:	1954-1959 ev. Volksschule in Rheine 1959-1965 Städt. Realschule in Rheine Abschluß der Mittleren Reife 1965-1968 Aufbaugymnasium Ibbenbüren Abschluß der Höheren Reife
Wehrdienst	:	1968-1969 als Polizeibeamter im Bundesgrenzschutz
Studium	:	WS 1969/70 Mathematik und Sport an der Ruhr-Universität Bochum WS 1970/71 wegen der stärkeren Beziehung zum Fach Sport, Wechsel von der Mathematik zum Fach Biologie SS 1975 I. Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium in den Fächern Sport und Biologie
Tätigkeiten	:	1975-1981 wiss. Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe für Funktionelle Morphologie an der Abteilung für Naturwissenschaftliche Medizin, Durchführung von Anatomiekursen für Medizinstudenten, Lehraufträge am Institut für Sportwissenschaft der Ruhr-Universität Bochum

DER DRUCKER - (Alte) Buscheystraße 138 - 4630 Bochum-Querenburg